
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

Ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович,
В.К. Конопелько, А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов,
В.В. Муравьев, Ю.В. Писецкий, А.С. Сигов, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,
И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,
В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк,
В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Куренев,
В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко,
В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко, А.А. Хмыль,
В.Ю. Цветков, В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Республика Беларусь

Телефон редакции: +375 17 293-88-41

www.doklady.bsuir.by; doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Вышинский Н. В. Исследование упругого скольжения в механизмах с гибким звеном с фрикционным сцеплением	5
Юник А. Д., Шидловский А. Г. Использование лазерной интерферометрии для определения времени окончания плазмохимического травления слоев р-GaN и AlGaN гетероструктуры р-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом	12

Пилипенко В. А., Солодуха В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В., Жигулин Д. В. Влияние термической нагрузки при формировании контактов Al-Al на электрические параметры интегральных микросхем с контактами алюминий-поликремний.....	20
Лашковская Е. И., Гога А. В., Плиговка А. Н., Чубенко Е. Б., Живулько В. Д., Монайко Э. В., Гапоненко Н. В. Ап-конверсионная люминесценция в ксерогеле титаната бария, легированном эрбием и иттербием, в пористом анодном оксиде алюминия.....	28
Емельянов В. В. Многослойные системы металлизации субмикронных интегральных схем	36
Пикуза М. О. Улучшение статистических характеристик аппаратного генератора случайных чисел программным способом	43
Пеньялоса Овальес Д. И., Бойправ О. В., Тумилович М. В., Гусинский А. В., Балтрукович П. И. Обоснование возможности использования электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов для снижения энергии электромагнитного излучения приборов электронной техники.....	48
Мордачев В. И., Ционенко Д. А. Влияние пространственной избирательности излучения базовых станций мобильной связи на уровень создаваемого ими электромагнитного фона	56
Апорович В. А. Отождествление сопровождаемых траекторий и отметок методом притяжения при вторичной обработке радиолокационной информации.....	65
Казючиц В. О., Боровиков С. М., Шнейдеров Е. Н. Модель прогнозирования времени тестирования компьютерной программы автоматизированной оценки надежности полупроводниковых приборов	72
Шарамет А. В. Многопоточная реализация свертки на основе блочных методов	81
Будько А. А., Дворникова Т. Н., Мисулин Е. А., Снапко Р. Ю. Сжатие изображений с использованием функций Уолша	88
Щербина Н. В. Прогнозирование способности к выработке навыка релаксации у машинистов локомотивных бригад.....	95

Ответственный секретарь редакции Т. В. Мироненко
Корректурa И. Н. Зюзикова
Верстка Л. В. Кондакова

Подписано в печать 29.11.2022. Формат 60×84 ¼. Бумага офисная. Отпечатано на ризографе.
Усл. печ. л. 12,32. Уч.-изд. л. 10,5. Тираж 85 экз. Заказ 226.
Индекс для индивидуальной подписки 00787.
Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2022

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal is being published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No. 1087.

The journal included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

Chief Editor

Vadim Anatol'evich Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Editor office address: P. Brovka St., 6, off. 326,
Minsk, 220013, Republic of Belarus
Editor office phone number: +375 17 293-88-41
www.doklady.bsuir.by; doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Vyshinski N. V. Investigation of Elastic Sliding in Mechanisms with a Flexible Link with a Friction Clutch	5
Yunik A. D., Shydouski A. H. Use of Laser Interferometry to Determine the End Time of the Plasma-Chemical Etching of p-GaN and AlGa _N Layers of the p-GaN/AlGa _N /Ga _N Heterostructure with Two-Dimensional Electron Gas.....	12
Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov J. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. Thermal Load Influence during the Formation of Al-Al Contacts on the Electrical Parameters of the Integrated Circuits with Aluminum-Polysilicon Contacts.....	20
Lashkovskaya E. I., Hoha A. V., Pligovka A. N., Chubenko E. B., Zhivulko V. D., Monaico E. V., Gaponenko N. V. Upconversion Luminescence in Barium Titanate Xerogel Doped with Erbium and Ytterbium in Porous Anodic Aluminum Oxide.....	28
Emelyanov V. V. Multilayer Metallization Systems of Submicron Integrated Circuits.....	36
Pikuza M. O. Statistical Characteristics Improvement of a Hardware Random Number Generator by a Software Method.....	43
Penialosa Ovalies D. I., Boiprav O. V., Tumilovich M. V., Gusinsky A. V., Baltrukovich P. I. Substantiation of the Possibility to Use the Electromagnetic Shields Based on Powdered Aluminum Oxides to Reduce the Electromagnetic Radiation Energy of Electronic Devices	48

Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Mobile Communication Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Introduced by them.....	56
Aparovich U. A. Association of the Tracked Trajectories and Marks by the Attraction Method during Secondary Processing of Radar Information.....	65
Kaziuchyts V. O., Borovikov S. M., Shneiderov E. N. Model for Prediction of Testing Time of a Computer Program for Automated Reliability Evaluation of Semiconductor Devices.....	72
Sharamet A. V. Multithreaded Convolution Implementation Based on Block Methods	81
Budzko A. A., Dvornikova T. N., Misulin E. A., Snapko R. U. Image Compression Using Walsh Functions	88
Shcherbina N. V. Prediction of the Ability to Develop the Relaxation Skill in Drivers of Locomotive Crews.....	95



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-5-11>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 621.85.052

ИССЛЕДОВАНИЕ УПРУГОГО СКОЛЬЖЕНИЯ В МЕХАНИЗМАХ С ГИБКИМ ЗВЕНОМ С ФРИКЦИОННЫМ СЦЕПЛЕНИЕМ

Н. В. ВЫШИНСКИЙ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 24.03.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Настоящая статья является продолжением исследований взаимодействия упруго деформируемой ленты со шкивом, представленных автором ранее. Если в предыдущей работе рассматривалось взаимодействие гибкой ленты (звена) с неподвижным шкивом, то в данной публикации изучено взаимодействие гибкого звена с ведущим и ведомым шкивами механизма при начале движения и в установившемся режиме. В результате теоретических исследований получено выражение для коэффициента, характеризующего явление упругого скольжения в механизмах с гибким звеном с фрикционным сцеплением. Отмечена линейная зависимость коэффициента упругого скольжения от коэффициента тяги, определяемого как отношение усилия сопротивления движению к двойному начальному натяжению ветвей гибкого звена. Получено выражение, оценивающее влияние явления упругого скольжения на значение передаточного отношения действительного механизма. Рассмотрено условие передачи движения в механизмах с гибким звеном с фрикционным сцеплением. Показано, что при превышении определенного значения коэффициента тяги в механизме вместо упругого скольжения наступает пробуксовывание.

Ключевые слова: гибкое звено, шкив, угол охвата, дуга скольжения, упругое скольжение, коэффициент тяги, упругие деформации.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вышинский Н. В. Исследование упругого скольжения в механизмах с гибким звеном с фрикционным сцеплением. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 5–11.

INVESTIGATION OF ELASTIC SLIDING IN MECHANISMS WITH A FLEXIBLE LINK WITH A FRICTION CLUTCH

NIKOLAI V. VYSHINSKI

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.03.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. This work is a continuation of the studies of the interaction of an elastically deformable belt with a pulley presented in the article. If in the previous work the interaction of a flexible belt (link) with a fixed pulley

was considered, then in this work the interaction of a flexible link with the leading and driven pulleys of the mechanism at the beginning of movement and in steady state is considered. As a result of theoretical studies, an expression was obtained for the coefficient characterizing the phenomenon of elastic sliding in mechanisms with a flexible link with a friction clutch. The linear dependence of the elastic slip coefficient on the thrust coefficient, defined as the ratio of the resistance force to the movement to the double initial tension of the branches of the flexible link, is noted. An expression estimating the effect of the elastic slip phenomenon on the value of the gear ratio of the actual mechanism is obtained. The condition of motion transmission in mechanisms with a flexible link with a friction clutch is considered. It is shown that when a certain value of the thrust coefficient is exceeded, slipping occurs in the mechanism instead of elastic sliding.

Keywords: flexible link, pulley, coverage angle, sliding arc, elastic sliding, traction coefficient, elastic deformations.

Conflict of interests. The author declares that there is no conflict of interest.

For citation. Vyshinski N. V. Investigation of Elastic Sliding in Mechanisms with a Flexible Link with a Friction Clutch. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 5–11.

Введение

В [1] рассмотрено взаимодействие с неподвижным шкивом упруго деформируемой гибкой ленты. Деформация охватывающей шкив гибкой ленты вызвана натяжением T_0 , действующим в каждой ее ветви. Выполненные исследования показали, что деформация растяжения гибкой ленты в зоне ее контакта со шкивом может происходить не по всей дуге охвата гибкой лентой шкива, а лишь по части дуги. Эта часть дуги охвата, где деформируется гибкая лента, определяется углом скольжения α_c (рис. 1), величина которого не зависит от усилия натяжения, а определяется значениями угла охвата и коэффициента трения для материалов шкива и ленты

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha_1}{\mu \sin \alpha_1}}, \quad (1)$$

где α_1 – половина угла охвата гибкой лентой шкива, $\alpha_1 = \alpha_{c1} + \alpha_{o1}$; μ – коэффициент трения для материалов гибкой ленты и шкива.

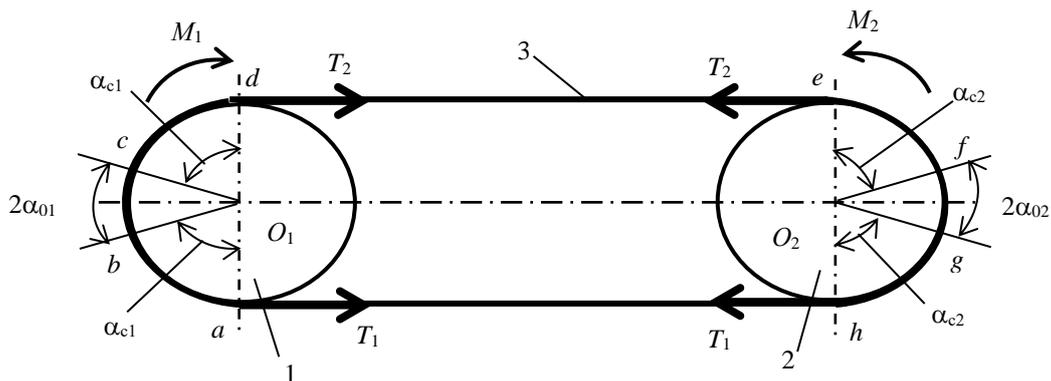


Рис. 1. Схема механизма с гибким звеном с фрикционным сцеплением
Fig. 1. The scheme of the mechanism with a flexible link with friction clutch

При определенных условиях в пределах дуги охвата может присутствовать участок, определяемый углом $2\alpha_{o1}$ (рис. 1), на котором отсутствует натяжение гибкого звена, т. е. гибкое звено, контактирующее с этим участком, не деформируется. Этот участок при угле охвата, равном π , будет присутствовать при значении коэффициента трения для материалов гибкого звена и шкива более 0,4 (1).

Теоретический анализ

Рассмотрим взаимодействие гибкой упруго деформируемой ленты (гибкого звена) 3 с ведущим 1 и ведомым 2 шкивами (рис. 1). Примем диаметры шкивов D_1 и D_2 (на рис. 1 не показаны) одинаковыми и, следовательно, одинаковыми и равными π углы охвата $2\alpha_1$ и $2\alpha_2$ гибким звеном соответственно шкивов 1 и 2.

При неподвижном ведущем шкиве 1 ($M_1 = 0$) усилия натяжения в обеих ветвях гибкого звена будут одинаковыми и равными начальному натяжению T_0 , т. е. $T_1 = T_2 = T_0$. В зонах контактирования гибкого звена со шкивами усилие натяжения будет изменяться от значения T_0 в точках a, d и b, h соответственно для ведущего и ведомого шкивов до нуля в точках b, c и f, g ведущего и ведомого шкивов. Изменение усилия натяжения гибкого звена, сопровождающееся его деформацией растяжения, будет происходить в пределах углов скольжения α_{c1}, α_{c2} и соответственно дуг скольжения ab, cd и ef, gh . Для участков ленты, определяемых углами $2\alpha_{01}, 2\alpha_{02}$ и соответственно дугами bc и fg , усилие натяжения отсутствует.

Изменение усилия натяжения в пределах дуг скольжения для углов охвата $2\alpha_1 = 2\alpha_2 = \pi$ будет определяться выражением

$$T = T_0 - \frac{\mu T_0 \pi}{2} \left(\frac{\pi}{2} - 2\alpha + \frac{2\alpha^2}{\pi} \right). \quad (2)$$

Рассмотрим изменения, которые произойдут в натяжении ветвей гибкого звена при начале работы механизма. При увеличении момента движущих сил M_1 , приложенного к ведущему шкиву 1, ведомый шкив 2 начнет движение только тогда, когда момент движущих сил станет равным моменту сил сопротивления M_2 , т. е. $M_1 = M_2$.

До начала движения ведомого шкива поворот ведущего шкива под действием движущего момента на угол $\Delta\varphi$ приведет к дополнительной упругой деформации Δl_1 набегающей (ведущей) ветви гибкого звена. Усилие натяжения набегающей ветви гибкого звена T_1 увеличится на ΔT и станет равным $T_1 = T_0 + \Delta T$. Поворот ведущего шкива на угол $\Delta\varphi$ при неподвижном ведомом шкиве приведет к смещению недеформированных участков гибкого звена, контактировавших со шкивом в пределах дуги bc , в зону дуги cd упругого скольжения. Это вызовет уменьшение абсолютного удлинения, вызванного предварительным натяжением T_0 , сбегающей (ведомой) ветви гибкого звена на Δl_2 , равное Δl_1 . Это приведет к уменьшению усилия натяжения сбегающей ветви на ту же величину ΔT и оно станет равным $T_2 = T_0 - \Delta T$.

Когда момент движущих сил окажется равным моменту сил сопротивления, начнется движение ведомого шкива. При этом разность натяжений набегающей и сбегающей ветвей гибкого звена будет равна приложенному к ведомому шкиву окружному усилию $F_{t2} = 2M_2/D_2$, т. е.

$$T_1 - T_2 = F_{t2} = 2\Delta T. \quad (3)$$

Из (3) получим выражение для изменений натяжений ведущей и ведомой ветвей гибкого звена

$$\Delta T = \frac{F_{t2}}{2} = \frac{M_2}{D_2}. \quad (4)$$

Изменение удлинений ветвей гибкого звена, вызванное изменением их натяжений, приводит к скольжению гибкого звена относительно шкивов в пределах дуг скольжения: ab и gh для ведущей и cd и ef для ведомой ветвей.

При установившемся режиме движения механизма участки гибкого звена, испытывающие натяжение, будут перемещаться в зоны контактирования с ведущим и ведомым шкивами, где отсутствует скольжение. Это участки дуг bc ведущего и fg ведомого звеньев. В пределах этих участков изменение усилий натяжения ветвей гибкого звена отсутствует. Изменение усилий натяжения ветвей гибкого звена будет происходить при перемещении их участков в зоны дуг скольжения ведущего и ведомого шкивов.

Усилие натяжения набегающей (ведущей) ветви при контакте с ведущим шкивом будет равно T_1 в пределах дуги abc . Для сбегаящей (ведомой) ветви усилие натяжения, равное T_2 , будет в пределах дуги efg ее контакта с ведомым шкивом. Уменьшение усилия натяжения гибкого звена от T_1 в набегающей ветви до T_2 в сбегаящей произойдет вследствие скольжения деформируемого гибкого звена относительно ведущего и ведомого шкивов в пределах дуг скольжения соответственно cd и ef . Это приведет к уменьшению скорости точек контакта гибкого звена по сравнению со скоростью точек контакта ведущего шкива, что вызовет замедление его движения.

Увеличение усилия натяжения гибкого звена от T_2 до T_1 станет происходить в пределах дуг скольжения gf и ab . Здесь уже будет наблюдаться обратное: скорость движения точек контакта гибкого звена окажется больше скорости точек контакта ведомого шкива.

Уменьшение скорости точек контакта сбегаящей ветви гибкого звена по сравнению со скоростью v_1 точек контакта ведущего шкива и увеличение скорости точек контакта набегающей ветви гибкого звена по сравнению со скоростью v_2 точек контакта ведомого шкива приведет к уменьшению скорости вращения ведомого шкива по сравнению с расчетным значением скорости. Явление уменьшения скорости вращения ведомого шкива действительного механизма, вызванное упругими деформациями гибкого звена, называется упругим скольжением.

Для оценки явления упругого скольжения в механизмах с гибким звеном с фрикционным сцеплением вводится коэффициент упругого скольжения ξ , определяемый как отношение разности скоростей точек контакта ведущего и ведомого шкивов к скорости точек контакта ведущего шкива

$$\xi = \frac{v_1 - v_2}{v_1}, \quad (5)$$

где v_1, v_2 – линейная скорость точек контакта с гибким звеном соответственно ведущего и ведомого шкивов.

Найдем выражение для коэффициента упругого скольжения механизма, схема которого представлена на рис. 1. Для холостого хода механизма ($M_2 = 0$) натяжения обеих ветвей гибкого звена одинаковые и равны T_0 . Если для ведущей и ведомой ветвей гибкого звена выделить одинаковые по длине элементарные участки Δl_{10} и Δl_{20} , то эти участки при холостом ходе будут перемещаться вдоль ветвей гибкого звена с одинаковыми скоростями $v_1 = v_2$. Скорости определяются как отношение длин элементарных участков к промежутку времени Δt , в течение которого поперечные сечения ветвей гибкого звена перемещаются на длину, равную длине соответствующего элементарного участка:

$$v_1 = \frac{\Delta l_{10}}{\Delta t}; \quad v_2 = \frac{\Delta l_{20}}{\Delta t}. \quad (6)$$

При $M_2 \neq 0$ произойдет перераспределение натяжений в ветвях гибкого звена, вследствие чего длина элементарных участков Δl_{10} и Δl_{20} изменится и станет равной:

– для набегающей ветви

$$\Delta l_1 = \Delta l_{10} + \frac{F_{t2} \Delta l_{10}}{2ES}; \quad (7)$$

– для сбегаящей ветви

$$\Delta l_2 = \Delta l_{20} - \frac{F_{t2} \Delta l_{20}}{2ES}, \quad (8)$$

где E – модуль упругости 1-го рода материала гибкого звена; S – площадь поперечного сечения гибкого звена.

С изменением длин элементарных участков ветвей гибкого звена изменятся и скорости прохождения ими этих ветвей. При этом время Δt , в течение которого поперечные сечения набегающей и сбегаящей ветвей гибкого звена перемещаются на длины соответствующих элементарных участков, будет для обеих ветвей одинаковым. Скорости перемещения поперечных сечений набегающей и сбегаящей ветвей определяются соответственно по формулам:

$$v_1 = \frac{\Delta l_1}{\Delta t}; \quad v_2 = \frac{\Delta l_2}{\Delta t}. \quad (9)$$

С учетом, что $\Delta l_{10} = \Delta l_{20}$, а также зависимостей (7)–(9) выражение (5) для коэффициента упругого скольжения ξ запишется в виде

$$\xi = \frac{v_1 - v_2}{v_1} = \frac{\Delta l_1 - \Delta l_2}{\Delta l_1} = \frac{\left(\Delta l_{10} + \frac{F_{t2}\Delta l_{10}}{2ES}\right) - \left(\Delta l_{20} - \frac{F_{t2}\Delta l_{20}}{2ES}\right)}{\Delta l_{10} + \frac{F_{t2}\Delta l_{10}}{2ES}} = \frac{2F_{t2}}{2ES + F_{t2}}. \quad (10)$$

Как следует из (10), значение коэффициента упругого скольжения зависит от передаваемого усилия F_{t2} и жесткости ES гибкого звена. Выразим коэффициент упругого скольжения через коэффициент тяги ν [2], определяемый как отношение окружного усилия F_{t2} к начальному натяжению в двух ветвях гибкого звена площадью поперечного сечения S

$$\nu = \frac{F_{t2}}{2T_0} = \frac{T_1 - T_2}{2T_0} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2\sigma_0}, \quad (11)$$

где σ_1 , σ_2 , σ_0 – нормальное напряжение соответственно в набегающей и сбегающей ветвях гибкого звена при $M_2 \neq 0$ и в обеих ветвях при $M_2 = 0$.

С учетом (11) преобразуем выражение (10) для коэффициента упругого скольжения к виду

$$\xi = \frac{2F_{t2}}{2ES + F_{t2}} = \frac{2(\sigma_1 - \sigma_2)}{2E + (\sigma_1 - \sigma_2)} = \frac{2\nu\sigma_0}{E + \nu\sigma_0}. \quad (12)$$

На рис. 2 представлена зависимость коэффициента упругого скольжения ξ от коэффициента тяги ν . Начальное напряжение σ_0 в ветвях гибкого звена принято равным 1,8 МПа, а модуль упругости материала гибкого звена $E = 200$ МПа.

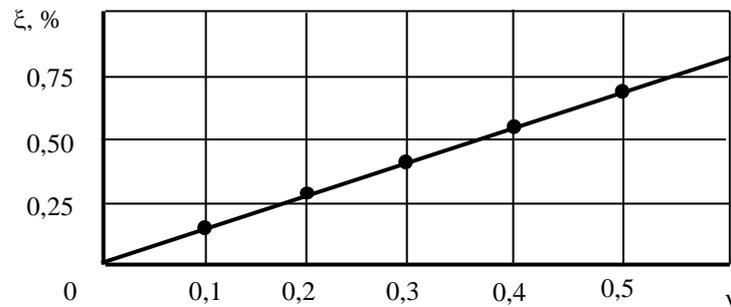


Рис. 2. Зависимость коэффициента упругого скольжения от коэффициента тяги
Fig. 2. Dependence of the elastic coefficient sliding from the thrust coefficient

Упругое скольжение в механизме с гибким звеном с фрикционным сцеплением вызовет несоответствие величины действительного передаточного отношения расчетному значению. Запишем выражение для действительного передаточного отношения

$$i_{1-2} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{2v_1/D_1}{2v_2/D_2} = \frac{\Delta l_1 D_2}{\Delta l_2 D_1} = \frac{\left(\Delta l_{10} + \frac{\Delta l_{10} F_{t2}}{2ES}\right) D_2}{\left(\Delta l_{20} - \frac{\Delta l_{20} F_{t2}}{2ES}\right) D_1} = \frac{D_2}{D_1 \left(1 - \frac{2F_{t2}}{2ES + F_{t2}}\right)} = \frac{D_2}{D_1 (1 - \xi)}, \quad (13)$$

где ω_1 , ω_2 – угловая скорость ведущего и ведомого шкивов; D_1 , D_2 – диаметр ведущего и ведомого шкивов.

Обсуждение результатов

Основываясь на полученных результатах, найдем условие передачи движения в механизме с гибким звеном с фрикционным сцеплением. Для передачи движения от ведущего шкива к ведомому необходимо, чтобы сила трения, распределенная в зоне контакта гибкого звена и шкивов, была больше окружной силы сопротивления, приложенной к ведомому шкиву, т. е. $F_{тр} > F_{i2}$. Будем считать, что нормальное давление в зоне контакта гибкого звена со шкивами распределяется в соответствии с выражением, приведенным в [1]:

$$q(\alpha) = \frac{T_0 \alpha_1 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_1} \right), \quad (14)$$

где α_1 – половина угла охвата гибким звеном шкива, $0 \leq \alpha \leq \alpha_1$.

Проинтегрируем в пределах изменения угла α выражение для элементарной силы трения $dF_{тр} = \mu q(\alpha) d\alpha$. Удвоенное значение полученного выражения будет являться силой трения, распределенной в пределах дуги охвата, определяемой углом $2\alpha_1$:

$$F_{тр} = 2 \int_0^{\alpha_1} \mu q(\alpha) d\alpha = 2 \int_0^{\alpha_1} \mu \frac{T_0 \alpha_1 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_1} \right) d\alpha = \frac{\mu T_0 \alpha_1^2 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1}. \quad (15)$$

При заданном значении силы сопротивления F_{i2} получим выражение для начального натяжения ветвей гибкого звена, обеспечивающего передачу движения от ведущего к ведомому шкиву:

$$T_0 > \frac{F_{i2} (1 - \cos \alpha_1)}{\mu \alpha_1^2 \sin \alpha_1}. \quad (16)$$

Из (16) с учетом формулы (11) найдем значения коэффициента тяги ν , при которых будет отсутствовать пробуксовывание

$$\nu < \frac{\mu \alpha_1^2 \sin \alpha_1}{2(1 - \cos \alpha_1)}. \quad (17)$$

Для угла охвата $2\alpha_1 = \pi$ выражение (17) примет вид

$$\nu < \frac{\mu \pi^2}{8}. \quad (18)$$

Из (18) следует, что при коэффициенте трения $\mu = 0,40$ пробуксовывание в механизме наступит при значении $\nu = 0,49$. Это вызовет резкое увеличение коэффициента упругого скольжения ξ . При значениях коэффициента тяги $\nu < 0,49$ коэффициент упругого скольжения будет линейно зависеть от ν и определяться выражением (12).

Заключение

В результате выполненных теоретических исследований получено выражение для коэффициента упругого скольжения в механизме с гибким звеном с фрикционным сцеплением. Коэффициент упругого скольжения зависит от усилия сопротивления движению ведомого шкива и жесткости гибкого звена. Явление упругого скольжения приводит к уменьшению значения скорости ведомого шкива действительного механизма по сравнению с расчетным. Найдено выражение для передаточного отношения действительного механизма с гибким звеном с фрикционным сцеплением, учитывающее влияние упругого скольжения. Для случая линейного распределения нормального давления в зоне контакта гибкого звена со шкивами получено условие передачи движения, т. е. отсутствия пробуксовывания, в механизме с гибким звеном.

Исследование коэффициента упругого скольжения показало, что он линейно зависит от коэффициента тяги, определяемого как отношение усилия сопротивления движению ведомого шкива к удвоенному начальному натяжению ветвей гибкого звена. При достижении коэффициентом тяги определенного значения в механизме не будет выполняться условие передачи движения и вместо упругого скольжения наступит пробуксовывание.

Список литературы

1. Вышинский, Н. В. Исследование свойств растягиваемой ленты в условиях деформации / Н. В. Вышинский // Доклады БГУИР. 2020. Т. 18, № 6. С. 11–17.
2. Скойбеда, А. Т. Ременные передачи / А. Т. Скойбеда, А. Н. Никончук. Минск: Навука і тэхніка, 1995.

References

1. Vyshinsky N. V. (2020) Investigation of the Properties of a Stretchable Tape under Deformation Conditions. *Reports of BGUIR*. 18 (6), 11–17 (in Russian).
2. Skoybeda A. T. (1995) *Belt Drives*. Minsk, Navuka i Tehnika Publ. (in Russian).

Сведения об авторе

Вышинский Н. В., к.т.н., профессор, профессор кафедры инженерной и компьютерной графики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Vyshinski N. V., Cand. of Sci., Professor, Professor at the Department of Engineering and Computer Graphics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 17 293-89-73
E-mail: vyshinski@bsuir.by
Вышинский Николай Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 17 293-89-73
E-mail: vyshinski@bsuir.by
Vyshinski Nikolai Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-12-19>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.323

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛАЗЕРНОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ОКОНЧАНИЯ ПЛАЗМОХИМИЧЕСКОГО ТРАВЛЕНИЯ СЛОЕВ p-GaN и AlGaN ГЕТЕРОСТРУКТУРЫ p-GaN/AlGaN/GaN С ДВУМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОННЫМ ГАЗОМ

А. Д. ЮНИК, А. Г. ШИДЛОВСКИЙ

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 31.08.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Методом лазерной интерферометрии и сканирующей электронной микроскопии установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного сигнала, регистрируемого детектором лазерного интерферометра с рабочей частотой 670 нм в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме в атмосфере $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ слоев GaN, p-GaN и AlGaN в гетероструктурах типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN, обусловленные изменениями их показателей преломления и скоростей травления. При реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме слоев GaN и p-GaN интенсивности отраженного сигнала изменяются по периодическому закону с периодом изменения толщины порядка 144 нм, а для слоев типа AlGaN – порядка 148 нм, что обусловлено различиями их показателей преломления и скоростей травления. При переходе границы раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN наблюдается скачкообразное изменение интенсивности отраженного сигнала в пределах 2,7–9,5 % в течение 20–40 с, обусловленное изменениями концентрации алюминия, показателей преломления и скорости травления на границах раздела. Изменение периодичности интерферограммы, сопровождающееся скачком интенсивности при переходе фронта травления через границу раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN, позволяет с помощью лазерной интерферометрии в реальном масштабе времени определять время окончания процесса реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме слоев AlGaN и p-GaN в гетероструктурах типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом. Полученные результаты могут быть использованы для формирования элементов устройств СВЧ и силовой электроники на основе гетероструктур типа AlGaN/GaN.

Ключевые слова: плазмохимическое травление, индуктивно-связанная плазма, лазерный интерферометр, нитрид галлия, гетероструктура, транзистор с высокой подвижностью электронов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Юник А. Д., Шидловский А. Г. Использование лазерной интерферометрии для определения времени окончания плазмохимического травления слоев p-GaN и AlGaN гетероструктуры p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 12–19.

USE OF LASER INTERFEROMETRY TO DETERMINE THE END TIME OF THE PLASMA-CHEMICAL ETCHING OF p-GaN AND AlGaN LAYERS OF THE p-GaN/AlGaN/GaN HETEROSTRUCTURE WITH TWO-DIMENSIONAL ELECTRON GAS

ANDREI D. YUNIK, ANDREI H. SHYDLOUSKI

JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 31.08.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Regularities of the reflected signal intensity changing in time, recorded by the detector of the laser interferometer with the operating frequency of 670 nm during the inductively coupled plasma reactive ion etching in a $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ atmosphere of GaN, p-GaN and AlGaN in AlGaN/GaN and p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures has been established by laser interferometry and scanning electron microscopy methods due to the changes in refractive indices and etching rates. During inductively coupled plasma reactive ion etching of GaN and p-GaN layers, the intensity of the reflected signal changes according to a periodic law with the thickness change period of about 144 nm, and for AlGaN layers about 148 nm, which is due to differences in their refractive indices and etching rates. During the crossing of the p-GaN/AlGaN and AlGaN/GaN interface, there is an abrupt change in the intensity of the reflected signal within 2.7–9.5 % for 20–40 s, due to changes in the aluminum concentration, refractive indices, and etching rate at the interfaces. The change in the periodicity of the interferogram, which is accompanied by a jump in intensity when passing through the etching front through the p-GaN/AlGaN and AlGaN/GaN interface, makes it possible to determine the end time of the inductively coupled plasma reactive ion etching of the AlGaN and p-GaN layers using laser interferometry in real time in AlGaN/GaN and p-GaN/AlGaN/GaN heterostructures with two-dimensional electron gas. The obtained results can be used to form microwave and power electronics devices elements which are based on the AlGaN/GaN heterostructures.

Keywords: plasma-chemical etching, inductively coupled plasma, laser interferometer, gallium nitride, heterostructure, high electron mobility transistor.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Yunik A. D., Shydouski A. H. Use of Laser Interferometry to Determine the End Time of the Plasma-Chemical Etching of p-GaN and AlGaN Layers of the p-GaN/AlGaN/GaN Heterostructure with Two-Dimensional Electron Gas. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 12–19.

Введение

В последнее десятилетие активное развитие получила технология создания устройств на широкозонных полупроводниках, в частности, на гетероструктурах (ГС) на основе GaN с двумерным электронным газом (ДЭГ). Среди таких устройств особое место занимают транзисторы с высокой подвижностью электронов (ТВПЭ). Для реализации ТВПЭ, как правило, используются ГС, выращенные на подложках кремния, сапфира или карбида кремния, включающие в себя целый ряд слоев, основными из которых являются GaN, AlN, AlGaN, а также p-GaN [1].

Слои ГС на основе GaN подвергают плазмохимическому травлению (ПХТ) при формировании изоляции устройств мезаканавками [2], областей затвора ТВПЭ [3], низкоомных омических контактов [4] и др. Как правило, ПХТ слоев ГС на основе GaN реализуют реактивным ионным травлением в индуктивно-связанной плазме (РИТ ИСП) в хлорсодержащих средах (Cl_2 или BCl_3) с добавлением кислорода (O_2) [5]. Основной особенностью данного процесса при формировании элементов ТВПЭ является необходимость прецизионного травления слоев ГС толщиной от нескольких единиц до нескольких десятков нанометров. Например, при селективном травлении слоя p-GaN относительно AlGaN при формировании области затвора нормально-закрытого ТВПЭ необходимо остановить травление точно на границе раздела, так как даже

незначительный затрав в AlGaN может приводить к существенному уменьшению концентрации электронов в ДЭГ и, как следствие, к увеличению сопротивления в открытом состоянии ($R_{ds_{on}}$) активной области канала транзистора [6].

Скорость, глубина и время окончания в процессе ПХТ обычно оцениваются предварительно для каждого слоя в отдельности по времени его травления на контрольных образцах. Однако в случае ПХТ тонких слоев, входящих в состав ГС для ТВПЭ, знания скорости травления каждого отдельного слоя, определенного предварительно, становится недостаточно. Для решения задачи прецизионного травления могут быть использованы различные методы контроля окончания процесса травления, такие как оптико-эмиссионная спектроскопия (ОЭС), спектроскопическая рефлектометрия (СР), спектральная эллипсометрия (СЭ), лазерная интерферометрия (ЛИ) и др. [7].

ОЭС, в том числе с применением дополнительных датчиков мониторинга импеданса плазмы, позволяет контролировать химическое и физическое состояние продуктов реакции в процессе ПХТ путем анализа собранных данных об интенсивности их длин волн. Однако объем данных, регистрируемых методом ОЭС, довольно велик, а процесс их обработки в реальном времени значительно усложняется из-за наличия встроенных шумов [8]. Также в случае ПХТ слоев ГС для ТВПЭ процесс обработки данных при использовании ОЭС может усложняться за счет присутствия примесей Al в различных концентрациях во всех слоях ГС, что ведет к снижению точности при определении времени окончания процесса травления.

Метод СР предусматривает измерение интенсивности отраженного излучения в широком диапазоне длин волн. Измерения по методу СР, как правило, выполняются в два этапа. На первом – калибровка сигнала – используют контрольный образец, для которого известен коэффициент отражения, и получают для него отраженный сигнал. На втором этапе измеряют интенсивность сигнала, отраженного от исследуемого образца, и вычисляют абсолютное значение коэффициента отражения в зависимости от длины волны. Фактически, отражательная способность образца измеряется и подгоняется к теоретической (референтной) для определения толщины слоя. Данный алгоритм подгонки, используемый для обработки данных, должен решать сразу несколько задач, таких как спектральная калибровка, фильтрация шума, распознавание характерных точек (минимумы, максимумы и т. д.) и вычисление аппроксимации первого порядка для толщины и окончательной точной подгонки, что значительно усложняет процесс [7].

Метод СЭ основан на изменении формы поляризации света после отражения от исследуемого образца при изменении толщины удаляемого слоя при ПХТ. По измеренным величинам при решении обратной задачи эллипсометрии на основе выбранной модели рассчитываются оптические параметры образца. В процессе измерения определяются не абсолютные, а относительные величины, что является важным достоинством метода [9]. Однако необходимость создания точной модели для многослойных ГС, используемых для изготовления ТВПЭ, – довольно сложная задача.

Наиболее удобным для определения времени окончания процесса ПХТ является метод ЛИ. Общий принцип детектирования сигнала лазерным интерферометром при РИТ ИСП слоев ГС на основе GaN заключается в возникновении интерференции между потоками излучения, возникающими при их отражении от резистивной маски, поверхности слоев ГС и границы между сапфировой подложкой и слоями ГС. Отраженные световые потоки от слоев накладываются при детектировании, что интерпретируется в виде интерферограммы зависимости отражательной способности образца от времени. При этом результирующая интенсивность светового потока будет являться периодической функцией изменения толщины слоя, подвергающегося травлению. Зависимость отражательной способности от времени в общем случае будет иметь вид синусоиды, а изменение толщины удаляемого при травлении слоя за один период синусоиды ΔT , нм, определяются по формуле [7]

$$\Delta T = \lambda / 2n, \tag{1}$$

где λ – рабочая длина волны детектора, нм; n – показатель преломления слоя, подвергающегося травлению, для слоев GaN и p-GaN $n \approx 2,33$, для AlGaN $n \approx 2,26$ [10].

Очевидно, что по интерферограмме скорости травления $U_{тр}$, нм/с, будет определяться как отношение изменения толщины слоя, подвергаемого травлению за один период интерферограммы, к длительности данного периода t , с

$$U_{\text{тр}} = \Delta T / t. \tag{2}$$

Тогда из (1) и (2) получим

$$U_{\text{тр}} = \lambda / 2nt. \tag{3}$$

Определим время окончания процесса РИТ ИСП слоев AlGaN и p-GaN в ГС типа AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN с ДЭГ с помощью ЛИ в реальном масштабе времени.

Методика проведения эксперимента

В эксперименте использовали ГС на подложке сапфира диаметром 100 мм двух типов: GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N с суммарной толщиной слоев порядка 3100 нм (рис. 1) и GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN с суммарной толщиной слоев 2600 нм (рис. 2).

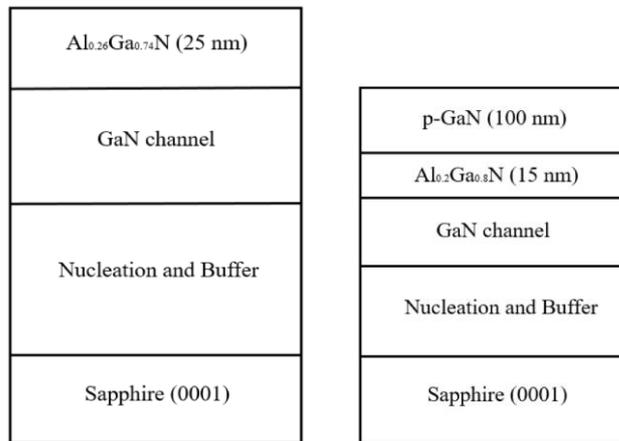


Рис. 1. Дизайн гетероструктуры GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N **Рис. 2.** Дизайн гетероструктуры GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN
Fig. 1. GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N heterostructure design **Fig. 2.** GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN heterostructure design

РИТ ИСП слоев ГС на основе GaN выполняли на установке плазмохимического травления типа STE ICP200ЕС (ЗАО «НТО», Россия) в смеси Cl₂/N₂/O₂ с расходами 40/10/5 см³ соответственно. Давление в камере поддерживалось на уровне 2 Па, мощность источника реактивно-ионного травления – 30 Вт, источника индуктивно-связанной плазмы – 300 Вт. Контроль изменения интенсивности световых потоков при травлении образцов и их интерпретацию в виде интерферограмм осуществляли с помощью лазерного интерферометра Horiba LEM G50 с рабочей длиной волны детектора (670 ± 10) нм (рис. 3).

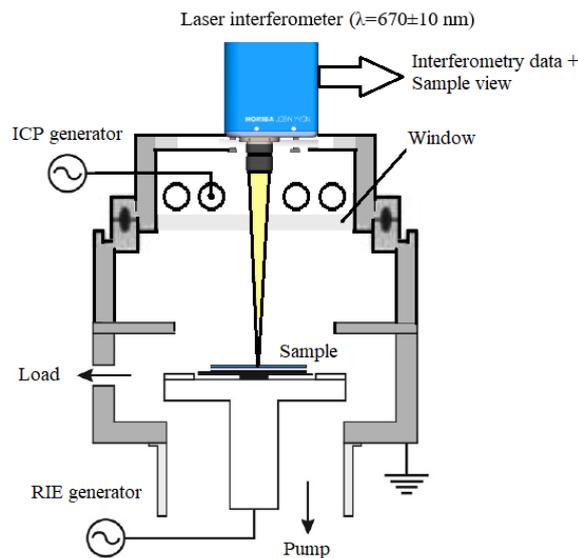


Рис. 3. Система реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме
Fig. 3. Inductively coupled plasma reactive ion etching system

На рис. 3 использованы следующие наименования: Laser interferometer – лазерный интерферометр; Interferometry data + Sample view – данные интерферометрии + просмотр образца; Window – окно; ICP generator – источник ИСП; Sample – образец; Load – загрузка; RIE generator – источник РИТ; Pump – откачка.

Глубину травления после окончания процесса дополнительно контролировали с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) типа S-4800 (Hitachi, Япония).

Результаты исследований и их обсуждение

Из интерферограммы, полученной в процессе травления слоев AlGaN и GaN в ГС типа GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N (рис. 4), видно, что в интервале времени травления от 0 до 860 с наблюдается монотонный рост интенсивности от 43,0 до 47,5 у. е. Такой вид данной части интерферограммы обусловлен тем, что в соответствии с формулой (1) одному периоду интерферограммы при травлении слоя AlGaN будет соответствовать изменение толщины около 148 нм. Таким образом, при толщине слоя AlGaN в 25 нм на интерферограмме должно наблюдаться около 17 % одного периода интерферограммы. То есть изменение интенсивности в указанном временном диапазоне однозначно трактуется как фрагмент периодической функции (синусоиды).

В интервале времени травления от 860 до 900 с наблюдается спад интенсивности с 47,5 до 43,5 у. е. связанный с приближением фронта травления к границе раздела между слоями AlGaN и GaN, где происходит уменьшение концентрации Al в слое AlGaN и увеличение показателя преломления *n*. Таким образом, можно однозначно утверждать, что при РИТ ИСП слоя AlGaN на GaN участок монотонного изменения интенсивности с последующим спадом в течение 900 с на интерферограмме (рис. 4) соответствует полному удалению слоя AlGaN толщиной 25 нм. При этом скорость травления слоя AlGaN составила около 0,028 нм/с.

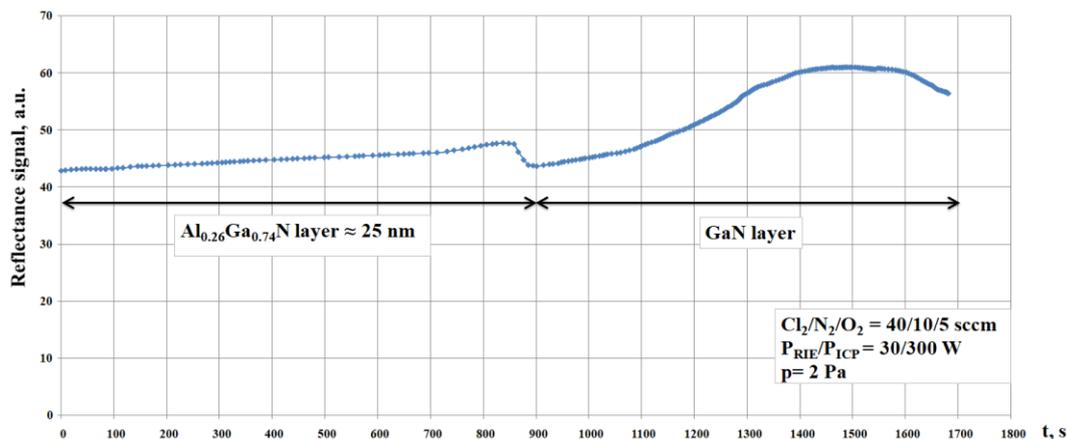


Рис. 4. Интерферограмма слоев AlGaN и GaN гетероструктуры GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N при реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме

Fig. 4. Interferogram of the AlGaN and GaN layers of GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N heterostructure during inductively coupled plasma reactive ion etching

Далее в интервале времени травления от 900 до 1700 с наблюдается изменение интенсивности световых потоков при травлении слоя GaN в виде части синусоиды, соответствующей более чем половине одного периода интерферограммы. Согласно формуле (1), данному периоду на интерферограмме будет соответствовать изменение толщины слоя GaN порядка 144 нм. В указанном интервале времени травления величина затрава в слой GaN составляет порядка 97 нм, что подтверждается результатами СЭМ (рис. 5). При этом скорость травления слоя GaN около 0,12 нм/с.

Таким образом, метод ЛИ позволяет в реальном масштабе времени определять момент окончания травления слоя AlGaN на GaN по изменению интенсивности отраженного сигнала, обусловленному изменением показателей преломления и скоростей травления AlGaN и GaN.

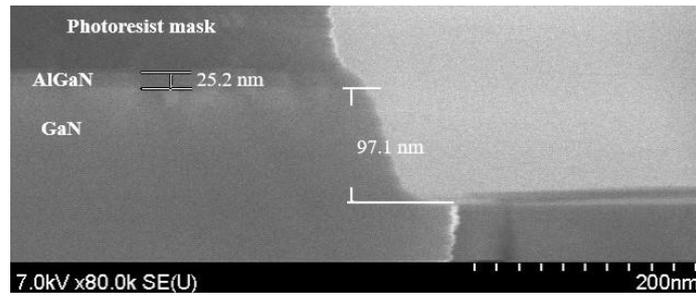


Рис. 5. СЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N после травления в течение 1700 с

Fig. 5. Cross section scanning electron image of the GaN/Al_{0.26}Ga_{0.74}N heterostructure after 1700 s etching

Из интерферограммы, полученной в процессе травления слоев p-GaN, AlGaN и GaN в ГС типа GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN (рис. 6), видно, что в интервале времени травления от 0 до 880 с наблюдается изменение интенсивности световых потоков при травлении слоя p-GaN по синусоидальному закону с периодом около 144 нм, что сопоставимо с результатами для нелегированного GaN.

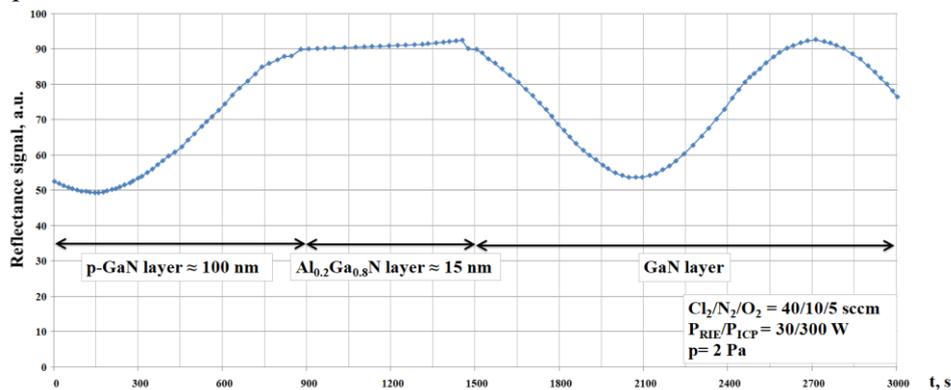


Рис. 6. Интерферограмма слоев p-GaN, AlGaN и GaN гетероструктуры GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN при реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме

Fig. 6. Interferogram of the p-GaN, AlGaN and GaN layers of GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN heterostructure during reactive ion etching in inductively coupled plasma

В интервале времени травления от 880 до 900 с наблюдается скачок интенсивности с 88 до 90 у. е., обусловленный приближением фронта травления к границе раздела между слоями p-GaN и AlGaN и, как следствие, увеличением концентрации Al в слое p-GaN и уменьшением показателя преломления n . Таким образом, можно утверждать, что при РИТ ИСП слоя p-GaN на AlGaN фрагмент синусоиды с последующим скачком в течение 900 с на интерферограмме рис. 6 соответствует полному удалению слоя p-GaN толщиной порядка 100 нм, что подтверждается результатами СЭМ (рис. 7). При этом скорость травления слоя p-GaN составила около 0,11 нм/с.

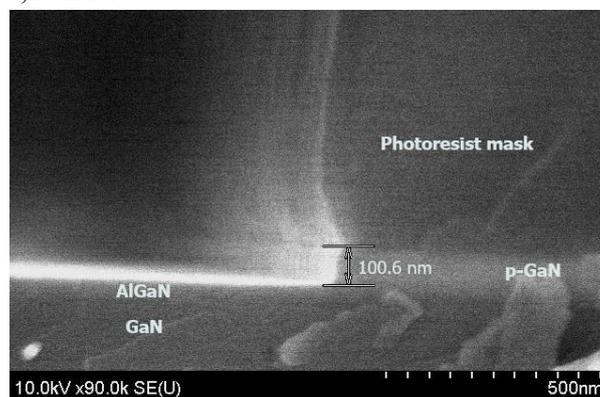


Рис. 7. СЭМ-изображение поперечного сечения гетероструктуры GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN после травления слоя p-GaN

Fig. 7. Cross section scanning electron image of the GaN/Al_{0.2}Ga_{0.8}N/p-GaN after p-GaN layer etching

В интервале времени травления от 900 до 1465 с наблюдается монотонный рост интенсивности от 90 до 92,5 у. е., представляющий собой фрагмент синусоиды порядка 10 % от ее периода, что соответствует толщине слоя AlGaN около 15 нм.

В интервале времени травления от 1465 до 1490 с наблюдается спад интенсивности с 92,5 до 90 у. е., обусловленный приближением фронта травления к границе раздела между слоями AlGaN и GaN. Таким образом, участок монотонного изменения интенсивности с последующим спадом в интервале от 900 до 1490 с на интерферограмме (рис. 5) соответствует полному удалению слоя AlGaN толщиной 15 нм.

В интервале времени травления от 1490 до 3000 с наблюдается изменение интенсивности световых потоков при травлении слоя GaN в виде синусоиды с периодом около 144 нм, что соответствует величине затравки в слой GaN порядка 181 нм.

Таким образом, метод ЛИ также позволяет в реальном масштабе времени определять момент окончания травления слоя p-GaN на AlGaN по изменению интенсивности отраженного сигнала, обусловленному изменением показателей преломления и скорости травления слоев p-GaN и AlGaN.

Заключение

1. Установлены закономерности изменения во времени интенсивности отраженного сигнала, регистрируемого детектором лазерного интерферометра с рабочей частотой 670 нм в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме в атмосфере $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ слоев GaN, p-GaN и AlGaN в гетероструктурах типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN, обусловленные изменениями их показателей преломления и скоростей травления.

2. При реактивном ионном травлении в индуктивно-связанной плазме слоев GaN и p-GaN интенсивности отраженного сигнала изменяются по периодическому закону с периодом изменения толщины порядка 144 нм, а для слоев AlGaN – порядка 148 нм, что обусловлено различиями их показателей преломления и скоростей травления. При переходе в процессе реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме границы раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN наблюдается скачкообразное изменение интенсивности отраженного сигнала в пределах 2,7–9,5 % в течение 20–40 с, обусловленное изменениями концентрации алюминия, показателей преломления и скорости травления на границах раздела.

3. Изменение периодичности интерферограммы, сопровождающееся скачком интенсивности при переходе фронта травления через границу раздела p-GaN/AlGaN и AlGaN/GaN, позволяет с помощью лазерной интерферометрии в реальном масштабе времени определять время окончания процесса реактивного ионного травления в индуктивно-связанной плазме слоев AlGaN и p-GaN в гетероструктуре типов AlGaN/GaN и p-GaN/AlGaN/GaN с двумерным электронным газом.

4. Полученные результаты могут быть использованы для формирования элементов устройств СВЧ и силовой электроники на основе гетероструктур AlGaN/GaN.

Список литературы / References

1. Alex Lidow, Michael de Rooij, Johan Strydom, David Reusch, John Glaser (2020) GaN Transistors for Efficient Power Conversion, 3rd ed. Hoboken. NJ, John Wiley & Sons, Inc., 384.
2. Rüdiger Quay (2008) Gallium Nitride Electronics. *Springer Series in Materials Science*. Springer Berlin, Heidelberg, 470. DOI:10.1007/978-3-540-71892-5.
3. Zhou Y., Zhong Y., Gao H., Dai S., He J., Feng M., Zhao Y., Sun Q., Dingsun A., Yang H. (2017) p-GaN Gate Enhancement-Mode HEMT Through a High Tolerance Self-Terminated Etching Process. *IEEE J. Electron Devices Soc.* 5 (5), 340–346. DOI:10.1109/JEDS.2017.2725320.
4. Yunik A. D., Solovjov Ja. A., Zhyhulin D. V. (2022) Effect of Rapid Thermal Annealing Temperature on the Electrophysical Properties of the Ohmic Contact of Ti/Al/Ni Metallization to the GaN/AlGaN Heterostructure. *Doklady BGUIR*. 20 (3), 13–19. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-3-13-19 (in Russian).
5. Han Y., Xue S., Guo W., Luo Y., Hao Z., Sun C. (2003) Highly Selective Dry Etching of GaN over AlGaN Using Inductively Coupled $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ Plasmas. *Jpn. J. Appl. Phys.* (42), L1139–L1141. DOI: 10.1143/JJAP.42.L1139.

6. Greco G., Iucolano F., Roccaforte F. (2018) Review of Technology for Normally-Off HEMTs with p-GaN Gate. *Mater. Sci. Semicond. Process.* (78), 96–106. DOI: 10.1016/j.mssp.2017.09.027.
7. Yoshio Nishi, Robert Doering (2007) *Handbook of Semiconductor Manufacturing Technology, 2nd ed.* CRC Press. 1720.
8. Noh H.-T., Kim D.-I., Han S.-S. (2015) Real Time Endpoint Detection in Plasma Etching Using Real-Time Decision Making Algorithm. *China Semiconductor Technology International Conference.* DOI: 10.1109/cstic.2015.7153380.
9. Azzam R. M. A., Bashara N. M. (1988) *Ellipsometry and Polarized Light, 3rd reprint 1999 ed.* North-Holland Personal Library. 558.
10. Brunner D., Angerer H., Bustarret E., Freudenberg F., Höppler R., Dimitrov R., Ambacher O., Stutzmann M. (1997) Optical Constants of Epitaxial AlGaIn Films and their Temperature Dependence. *Journal of Applied Physics.* 82 (10), 5090–5096. DOI: 10.1063/1.366309.

Вклад авторов

Юник А. Д. подготовил экспериментальные образцы, выполнил анализ и интерпретацию полученных результатов.

Шидловский А. Г. выполнил травление экспериментальных образцов и интерпретировал полученные результаты.

Authors' contribution

Yunik A. D. made experimental samples, performed analysis and interpretation of the results.

Shydloouski A. H. performed etching of experimental samples and interpretation of the results.

Сведения об авторах

Юник А. Д., ведущий инженер отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Шидловский А. Г., ведущий инженер-технолог отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Information about the authors

Yunik A. D., Leading Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Shydloouski A. H., Leading Process Engineer of the Branch Laboratory of New Technologies and Materials of “Transistor” of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Корженевского, 16, к. 247
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Отраслевая лаборатория новых технологий и материалов
Тел. +375 29 854-66-51
E-mail: a.unik.gan@gmail.com
Юник Андрей Дмитриевич

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Korzhenevskogo St., 16, r. 247
JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company
Branch Laboratory of New Technologies and Materials
Tel. +375 29 854-66-51
E-mail: a.unik.gan@gmail.com
Yunik Andrei Dmitrievich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-20-27>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ КОНТАКТОВ Al-Al НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИНТЕГРАЛЬНЫХ МИКРОСХЕМ С КОНТАКТАМИ АЛЮМИНИЙ-ПОЛИКРЕМНИЙ

В. А. ПИЛИПЕНКО, В. А. СОЛОДУХА, Н. С. КОВАЛЬЧУК, Я. А. СОЛОВЬЁВ,
Д. В. ШЕСТОВСКИЙ, Д. В. ЖИГУЛИН

ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 11.08.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Статья посвящена установлению влияния применения быстрой термической обработки (450 °С, 7 с) для формирования омического контакта между двумя слоями алюминиевой металлизации на электрические параметры и надежность интегральных микросхем. В качестве анализируемых параметров выбраны величины сопротивлений контактных цепочек алюминий-кремний, алюминий-поликремний, поликремний-кремний p⁺, алюминий-кремний p⁺, вольт-амперные характеристики тестовых биполярных транзисторов, а также результаты анализа их надежности путем проведения термополевых испытаний. Сравнение этих параметров проводилось относительно микросхем, изготовленных с применением стандартной термообработки (450 °С, 20 мин) для формирования данного контакта. Анализ результатов величины сопротивления различных контактных цепочек показал, что независимо от вида термообработки все контактные цепочки, за исключением цепочки контактов алюминий-поликремний, имеют практически одинаковое сопротивление. Путем анализа элементного состава скола в области данного контакта методом растровой электронной микроскопии установлено, что при быстрой термической обработке глубина проникновения алюминия в поликремний в два раза меньше, чем при стандартном его формировании, за счет уменьшения в два раза времени воздействия высокой температуры. Это приводит к более низкой концентрации алюминия в кремнии и, как результат, – к более высокому контактному сопротивлению между алюминием и поликремнием. Анализ вольт-амперных характеристик показал, что все они идентичны за исключением хода прямой ветви зависимости величины базового тока от напряжения эмиттер-база. Отклонение линейного характера данной зависимости в области малых значений напряжения (≤ 200 мВ) в случае формирования омических контактов Al-Si и Al-Al с применением длительных термических обработок обусловлено преобладанием в данной области генерационно-рекомбинационного тока, связанного с повышенной плотностью ловушек в обедненной области и на поверхности полупроводника. Идеальное поведение базового тока в зависимости от напряжения эмиттер-база сохраняется с применением быстрой термообработки по формированию контакта Al-Al за счет устранения ловушек как в обедненном слое, так и на поверхности полупроводника. Проведенные испытания на надежность таких изделий показали, что она не зависит от вида формирования омического контакта между слоями металлизации.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, омические контакты, температурная нагрузка, вольт-амперная характеристика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пилипенко В. А., Солодуха В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В., Жигулин Д. В. Влияние термической нагрузки при формировании контактов Al-Al на электрические параметры интегральных микросхем с контактами алюминий-поликремний. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 20–27.

THERMAL LOAD INFLUENCE DURING THE FORMATION OF Al-Al CONTACTS ON THE ELECTRICAL PARAMETERS OF THE INTEGRATED CIRCUITS WITH ALUMINUM-POLYSILICON CONTACTS

VLADIMIR A. PILIPENKO, VITALY A. SOLODUKHA, NATALLIA S. KOVALCHUK,
JAROSLAV A. SOLOVJOV, DMITRY V. SHESTOVSKI, DMITRY V. ZHYHULIN

JSC "INTEGRAL" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 11.08.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. This work is devoted to establishing the effect of using rapid thermal processing (RTP) method (450 °C, 7 s) to form an ohmic contact between two layers of aluminum metallization on the electrical parameters and reliability of integrated circuits. The resistance values of contact chains aluminum-silicon, aluminum-polysilicon, polysilicon-silicon n⁺, aluminum-silicon n⁺, current-voltage characteristics of the tested bipolar transistors, as well as the results of the reliability analyses by conducting thermal field tests were chosen as the analyzed parameters of this microcircuit. Comparison of these parameters was carried out with respect to the microcircuits manufactured using standard RTP method (450 °C, 20 min) to form this contact. An analysis of the results of the resistance value of various contact chains showed that, regardless of the type of thermal treatment, all contact chains, with the exception of the aluminum-polysilicon contact chain, have almost the same resistance. By analyzing the elemental composition of the cleavage in the area of this contact by scanning electron microscopy, it was found that during rapid heat treatment, the depth of penetration of aluminum into polysilicon is 2 times less than during its standard formation due to a 2-fold reduction in the time of exposure to high temperature compared to the standard process. This leads to a lower concentration of the aluminum in the silicon and as a result to a higher contact resistance between the aluminum and polysilicon. An analysis of the current-voltage characteristics showed that they are all identical, except for the course of the direct branch of the base current value from the emitter-base voltage. The deviation of the linear nature of this dependence in the region of their low voltage values (≤ 200 mV) in the case of the formation of ohmic Al-Si and Al-Al contacts with the use of long-term heat treatments is due to the predominance of the generation-recombination current in this region associated with an increased density of traps in the depleted region and on the surface of the semiconductor. The ideal behavior of the base current versus the emitter-based voltage is maintained by applying rapid RTP method to form an Al-Al contact by eliminating traps both in the depletion layer and on the surface of the semiconductor. The tests carried out on the reliability of these products showed that it does not depend on the type of formation of ohmic contacts between the metallization layers.

Keywords: rapid thermal processing method, ohmic contact, thermal load, I-V characteristics.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov J. A., Shestovski D. V., Zhyhulin D. V. Thermal Load Influence during the Formation of Al-Al Contacts on the Electrical Parameters of the Integrated Circuits with Aluminum-Polysilicon Contacts. *Doklady BGUIR*. 2022. 20 (7), 20–27.

Введение

Одним из основных условий увеличения степени интеграции электронной элементной базы, а также повышения ее надежности, является снижение тепловой нагрузки, оказываемой на полупроводниковую пластину в процессе формирования на ней интегральных микросхем (ИМС). Данный подход позволяет уменьшить перераспределение введенной при ионном легировании примеси, величину переходного слоя «эпитаксиальная пленка – скрытый n⁺-слой», глубину проникновения алюминия в кремний и практически исключить загрязнение полупроводникового материала неконтролируемыми примесями [1]. Особенно остро этот вопрос стоит при формировании омических контактов к кремнию и поликремнию

с применением длительной термической обработки (510 °С, 10 мин). Как ранее установлено, такая термическая обработка для формирования омических контактов вызывает интенсивное взаимодействие кремния с алюминием, приводящее к значительному ухудшению параметров создаваемых ИМС, а, следовательно, к снижению процента выхода годных изделий [2]. Согласно [2], здесь имеет место либо значительное проникновение алюминия в кремний для пленок чистого алюминия, либо образование островков кремния, легированного алюминием, на границе между алюминием и кремнием для пленок алюминия, легированного кремнием. В первом случае это приводит к уменьшению пробивных напряжений эмиттер-база или даже к их короткому замыканию, во втором – к повышению контактного сопротивления алюминий-кремний p^+ .

Один из методов, существенно снижающих диффузионные процессы при высокотемпературных обработках, в том числе при формировании омических контактов, – применение быстрых термических обработок [3–11]. Однако в этих публикациях рассматриваются моменты, касающиеся только формирования омического контакта между алюминием и монокристаллическим кремнием. При этом совершенно не затрагиваются вопросы по формированию такого контакта с поликристаллическим кремнием и влияния на его поведение снижения температурных нагрузок при создании многоуровневой металлизации. Проведение таких исследований позволит установить основные причины его деградации при использовании длительной термической обработки и предложить пути их уменьшения.

Методика проведения эксперимента

Для исследования влияния быстрой термообработки на электрические параметры ИМС выбрали микросхему, имеющую в своем составе как биполярные, так и МОП-транзисторы с поликремневыми эмиттерами и затворами. В данном случае термообработкой либо процессом быстрой термообработки (БТО) формировались омические контакты между первым и вторым уровнями алюминиевой металлизации.

Стандартную термообработку проводили в атмосфере N_2 с температурой основного интервала 450 °С и длительностью 20 мин. Термообработку выполняли для всех пластин после напыления первого уровня Al и для одной части пластин после напыления второго уровня Al. Для второй части пластин после напыления второго слоя Al проводили БТО.

Процесс БТО пластин выполнялся в стационарной атмосфере N_2 при атмосферном давлении системой УБТО ПИТ1801. Пластины облучались с непланарной стороны потоками фотонов 20 галогенных ламп импульсами постоянной мощности длительностью 7 с в режиме теплового баланса. Мощность излучения ламп подбирали предварительно по достижении максимальной температуры фотонной обработки 450 °С в течение 7 с при проведении тестовых процессов на аналогичных пластинах.

В качестве анализируемых параметров ИМС были выбраны величины сопротивлений контактных цепочек алюминий-кремний, алюминий-поликремний, поликремний-кремний p^+ , алюминий-кремний p^+ , вольт-амперные характеристики тестовых биполярных транзисторов, а также результаты анализа их надежности путем проведения термополевых испытаний. Определение величин сопротивлений контактных цепочек и измерения вольт-амперных характеристик тестовых транзисторов осуществляли на комплексе прецизионных измерений вольт-амперных (I-V) и вольт-фарадных (C-V) характеристик B1500 ф. Agilent (США) с зондовой станцией Summit 11000 AP ф. Cascade.

Оценку надежности микросхемы выполняли путем проведения термополевых испытаний подзатворного диэлектрика. При этом оценивали изменения параметров МОП-структуры после перевода ее в состояние принудительного распределения подвижных ионов вблизи границы раздела «кремний – диэлектрик» относительно исходного состояния. Процедура оценки надежности состояла из следующих операций:

- измерение исходной вольт-амперной характеристики для МОП-транзистора;
- выдержка структуры при температуре $T = 200$ °С в течение $t = 5$ мин с приложением положительного потенциала на затвор относительно подложки (кармана) величиной, соответствующей напряженности электрического поля в диэлектрике $E = 2$ МВ/см;

- охлаждение образца до температуры $T \leq 40$ °С без снятия напряжения на затворе;
- измерение конечной сток-затворной вольт-амперной характеристики для МОП-транзистора.

Изменение параметров МОП-структуры оценивали по величине сдвига порогового напряжения для МОП-транзисторов путем анализа его величины и соответствия ее установленным нормам. Исследование границы раздела контакта алюминий-поликремний осуществляли на его сколе путем анализа изображения и распределения элементного состава на сколе в области данного контакта с применением растрового электронного микроскопа S-4800 фирмы Hitachi (Япония) с энергодисперсионным спектрометром Quantax 200 фирмы Bruker (Германия).

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ результатов величины сопротивления различных контактных цепочек, полученных на тестовых элементах ИМС, показал, что в независимости от вида термообработки все контактные цепочки, за исключением цепочки контактов алюминий-поликремний (Al-poly-Si), имеют практически одинаковое сопротивление (табл. 1).

Таблица 1. Влияние вида термообработки на величину сопротивления контактных цепочек интегральных микросхем с двухуровневой системой металлизации

Table 1. Influence of the type of thermal treatment on the resistance value of contact chains with a two-level metallization system

Параметр / Parameter	Вид термообработки для формирования омических контактов / Type of heat treatment for the formation of ohmic contacts	
	Первый и второй уровни Al-металлизации (450 °С, 20 мин) / First and second levels of Al-plating (450 °С, 20 min)	Первый (450 °С, 20 мин) и второй (450 °С, 7 с) уровни Al-металлизации / First (450 °С, 20 min) and second (450 °С, 7 s) levels Al-plating
Сопротивление контактной цепочки, кОм: Al-p ⁺ -Si	88,08	88,05
Al-poly-Si	16,70	18,17
Al-n ⁺ -Si	19,26	19,57
Al-n ⁺ -Si	7,09	7,85

Учитывая, что в случае длительной термической обработки (450 °С в течение 20 мин) для формирования омических контактов как первого уровня алюминиевой металлизации к поликремнию и кремнию, так и второго уровня алюминиевой металлизации к нижнему слою разводки, контакты первого уровня разводки фактически подвергаются термообработке в течение 40 мин. В этом случае следует ожидать, что за счет более длительного времени диффузии алюминия в поликремний (по сравнению с использованием для формирования контакта Al-Al быстрой термообработки при 450 °С в течение 7 с) глубина проникновения алюминия в поликремний должна быть больше в два раза, а также выше его концентрация. Поскольку диффузия алюминия в поликремний идет в основном по межзеренному пространству, то это должно приводить к снижению сопротивления поликремния, а следовательно, и к более низкому сопротивлению контактной цепочки Al-poly-Si, что имеет место в действительности.

Для подтверждения предположения о разной глубине диффузии алюминия в поликремний при формировании омических контактов при различных видах термообработки методом растровой электронной микроскопии на сколах кристалла, проходивших через контакт Al-poly-Si, анализировали элементный состав по глубине скола (рис. 1, 2).

Как показали проведенные исследования в случае применения БТО (450 °С, 7 с) для формирования омического контакта между двумя слоями металлизации, глубина проникновения алюминия в поликремний в два раза меньше, чем при стандартном его формировании. Это обуславливается тем, что в первом случае время воздействия высокой температуры (450 °С, 20 мин) в два раза меньше, чем время воздействия данной температуры в стандартном процессе формирования омических контактов. Кроме того, по результатам исследований также видны изменения как в величине концентрации кремния в алюминии, так и смещение границы раздела Al-poly-Si в сторону поликремния. Увеличение концентрации кремния в алюминии полностью обуславливается как его диффузией в пленку алюминия,

так и насыщением алюминием пленки поликремния. При этом данные процессы протекают быстро потому, что идут по границам зерен, где коэффициенты Al в Si и Si в Al значительно выше, чем при формировании контакта алюминия с монокристаллическим кремнием.

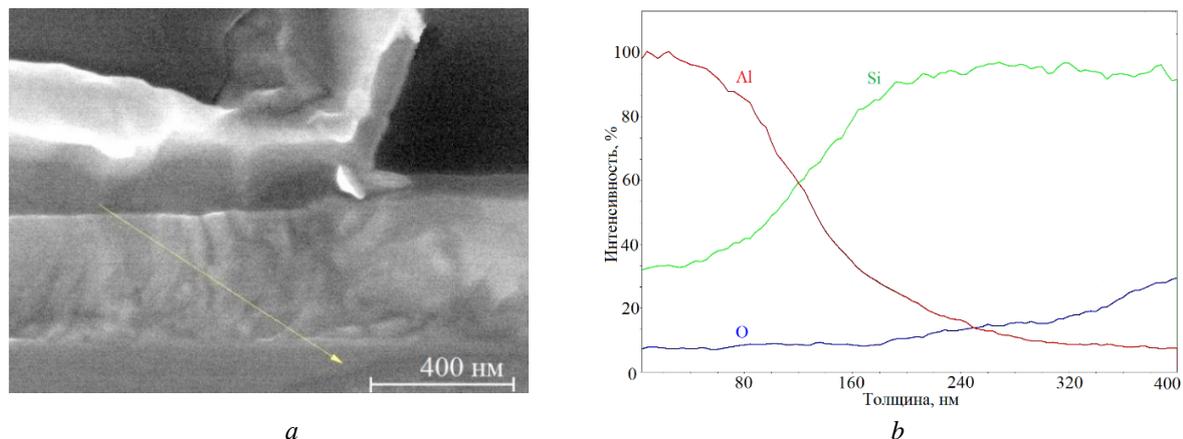


Рис. 1. Вид скола контакта алюминий-полосиликоний (*a*) и профиль распределения элементов по указанному на нем направлению (*b*) для приборов с формированием омического контакта между слоями металлизации с применением длительной термообработки

Fig. 1. View of the cleavage of the aluminum-polosilicon contact (*a*) and the profile of the distribution of elements along the direction indicated on it (*b*) for devices with the formation of an ohmic contact between metallization layers using long thermal treatment

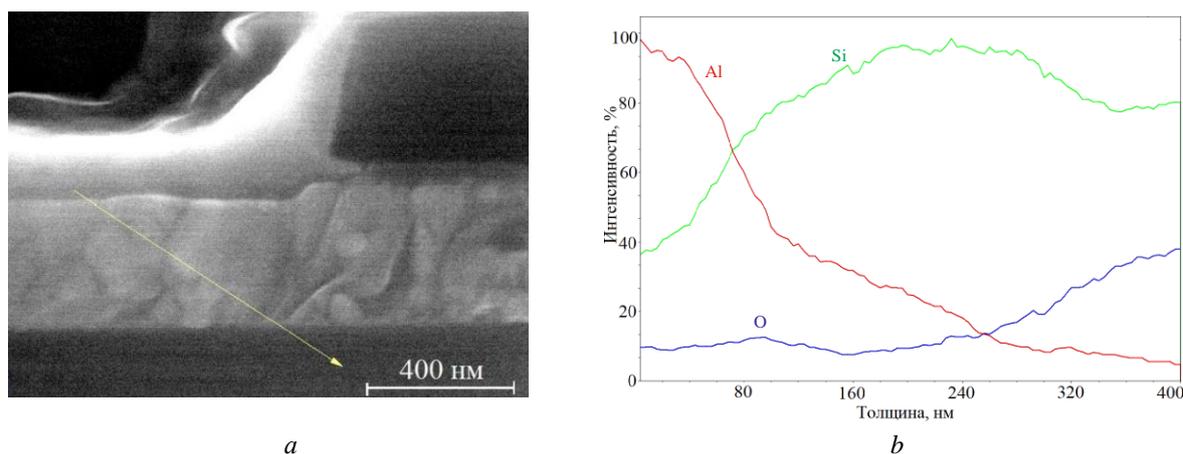


Рис. 2. Вид скола контакта алюминий-полосиликоний (*a*) и распределение элементов по указанному на нем направлению (*b*) для приборов с формированием омического контакта между слоями металлизации с применением быстрой термообработки

Fig. 2. View of the cleavage of the aluminum-polosilicon contact (*a*) and the distribution of elements along the direction indicated on it (*b*) for devices with the formation of an ohmic contact between metallization layers using rapid thermal processing

Данное обстоятельство объясняется, с одной стороны, снижением энергии активации процесса диффузии по межзеренному пространству по сравнению с объемным материалом, а с другой – более низкой энергией активации процессов диффузии для материалов, имеющих поликристаллическую структуру. В конечном счете, происходит как уменьшение толщины пленки поликремния, так и насыщение его поверхности алюминием. Насыщение алюминия кремнием приводит к увеличению его сопротивления из-за насыщения его межзеренного пространства кремнием, препятствующим протеканию электрического тока через эти границы. Для решения вопроса о влиянии применения БТО при формировании омического контакта между двумя слоями металлизации на параметры тестового биполярного транзистора, входящего в состав ИМС, проводили анализ его вольт-амперных характеристик на приборах, изготовленных по традиционной технологии и с применением БТО. Анализ полученных результатов показал, что все характеристики идентичны за исключением хода прямой ветви зависимости величины базового тока от напряжения эмиттер-база (рис. 3).

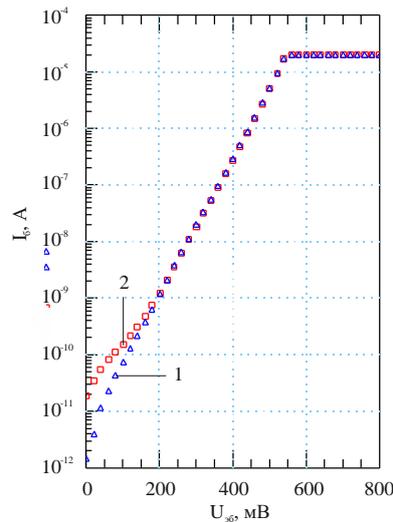


Рис. 3. Зависимость величины базового тока от напряжения эмиттер-база для приборов с формированием омических контактов Al-Si и Al-Al с применением длительных (450 °С, 20 мин в среде N₂) (1) и быстрой термообработок (450 °С, 7 с в среде N₂) для формирования контакта Al-Al (2)
Fig. 3. Dependences of the value of the base current on the emitter-base voltage for devices with the formation of ohmic Al-Si and Al-Al contacts with the use of long (450 °C, 20 min in N₂ medium) (1) and the use of RTP (450 °C, 7 s in N₂ medium) for forming Al-Al contact (2)

Отклонение линейного характера зависимости величины базового тока от напряжения эмиттер-база в области их малых значений (≤ 200 мВ) в случае формирования омических контактов Al-Si и Al-Al с применением длительных термических обработок (450 °С, 20 мин в среде N₂) происходит из-за преобладания в данной области генерационно-рекомбинационного тока, обусловленного повышенной плотностью ловушек в обедненной области и на поверхности полупроводника. Образование таких ловушек на поверхности связано в основном с наличием на ней или вблизи ее ионных загрязнений, а также деформационных нарушений кристаллической решетки кремния за счет ее химико-механической полировки. Такие ловушки индуцируют образование зарядов в кремнии, приводя к формированию поверхностных каналов или поверхностных обедненных слоев [12]. Их наличие из-за влияния на обедненную область $p-n$ -перехода приводит к возрастанию поверхностных токов утечки за счет генерационно-рекомбинационного тока.

В случае применения БТО (450 °С, 7 с в среде N₂) для формирования контакта Al-Al идеальное поведение базового тока в зависимости от напряжения эмиттер-база сохраняется. Данный результат позволяет утверждать, что при таком виде нагреве для формирования контакта Al-Al можно практически устранить данные ловушки как в обедненном слое, так и на поверхности полупроводника.

Для анализа влияния применения БТО при формировании омического контакта между слоями металлизации на надежность ИМС по сравнению с традиционным методом его формирования проводили термополевые испытания. По их результатам отмечено, что надежность данных изделий соответствует установленным нормам и не зависит от вида формирования омического контакта между слоями металлизации. Это означает, что применение БТО для формирования такого контакта не приводит к ухудшению надежности изделия и может быть использовано для уменьшения тепловых нагрузок при его создании.

Заключение

Использование в технологическом маршруте создания интегральных микросхем процесса быстрой термообработки пластин в стационарной атмосфере N₂ с длительностью фотонной обработки 7 с и максимальной температурой 450 °С для формирования омических контактов между первым и вторым уровнями алюминиевой металлизации приводит к увеличению сопротивления цепочки контактов алюминий-поликремний. Данное обстоятельство обуславливается тем, что глубина проникновения алюминия в поликремний в два раза меньше, чем при стандартном его формировании, что приводит к более низкой концентрации алюминия

в кремнии и, как результат, – к более высокому контактному сопротивлению между алюминием и поликремнием. При этом имеет место устранение генерационно-рекомбинационного тока, связанного с повышенной плотностью ловушек в обедненной области и на поверхности полупроводника. Испытания на надежность таких изделий показали, что она не зависит от вида формирования омического контакта между слоями металлизации.

Список литературы

1. Пилипенко, В. А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В. А. Пилипенко. Минск: Издательский центр БГУ, 2004.
2. Технология СБИС. Т. 2 / Под ред. С. М. Зи. М.: Мир, 1986.
3. Фазы внедрения в технологии полупроводниковых приборов и СБИС / О. А. Агеев [и др.]. Харьков: НТК Институт монокристаллов, 2008.
4. Физические основы быстрой термообработки. Создание многоуровневой металлизации / В. М. Анищик [и др.]. Минск: БГУ, 2000.
5. Особенности взаимодействия системы Al-Si при термической и импульсной оптической обработках / Л. Д. Буйко [и др.] // Электронная техника. 1984. Сер. 6, вып. 2. С. 16–19.
6. Пилипенко, В. А. Использование фотонных технологических процессов при изготовлении интегральных микросхем / В. А. Пилипенко, Ю. П. Попов // Электронная промышленность. 1988. Вып. 5. С. 3–9.
7. Пилипенко, В. А. Модель взаимодействия кремния с алюминием при фотонной обработке / В. А. Пилипенко, В. В. Рожков, В. А. Горушко // Электронная техника. 1990. Сер. 2, вып. 3. С. 24–28.
8. Улучшение термостабильности пленок алюминия и его сплавов на кремнии с использованием быстрой термообработки / В. А. Пилипенко [и др.] // Вестник БГУ. 1998. Сер. 1, № 3. С. 53–58.
9. Пилипенко, В. А. Управление свойствами тонкопленочных систем с применением импульсной фотонной обработки / В. А. Пилипенко, В. Н. Пономарь, В. А. Горушко // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 4. С. 95–98.
10. Моделирование морфологии пленок алюминия до и после различных видов термообработки / В. А. Пилипенко [и др.] // ИФЖ. 2003. Т. 76, № 4. С. 99–103.
11. Токотенос по металлическим шунтам в омических контактах n^+ -Si / А. В. Саченко [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2014. Т. 48, вып. 4. С. 509–514.
12. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, Lee M. K. New York: John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012.

References

1. Pilipenko V. A. (2004) *Rapid Thermal Processing in VLSI Technology*. Minsk, Publishing Center of Belarusian State University (in Russian).
2. Sze S. M. (ed.) (1986) *VLSI Technology*. 2. Moscow, Mir (in Russian).
3. Ageev O. A., Belyaev A. E., Boltovets N. S., Konakova R. V., Milenin V. V., Pilipenko V. A. (2008) *Phases of Implantation in Semiconductor Devices and VLSI Technology*. Kharkov, NTK Institute of Single Crystals (in Russian).
4. Anyshchik V. M., Horushko V. A., Pylypenko V. A., Ponomar V. N., Ponaryadov V. V. (2000) *Physical Fundamentals of Rapid Thermal Processing. Creation of Multilevel Metallization*. Minsk, Belarusian State University (in Russian).
5. Buiko L. D., Lesnikova V. P., Pilipenko V. A., Rozhkov V. V. (1984) Features of Al-Si System Interaction During Thermal and Pulsed Optical Processing. *Elektronnaya Tekhnika = Electronic Technique*. 6 (2), 16–19 (in Russian).
6. Pilipenko V. A., Popov Yu. P. (1988) The Use of Photonic Technological Processes in the Manufacture of Integrated Circuits. *Elektronnaya Promyshlennost = Electronic Industry*. (5), 3–9 (in Russian).
7. Pilipenko V. A., Rozhkov V. V., Horushko V. A. (1990) Model of Interaction of Silicon with Aluminum During Photonic Processing. *Elektronnaya Tekhnika = Electronic Technique*. 2 (3), 24–28 (in Russian).
8. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Horushko V. A., Tarasik M. I., Yanchenko A. M. (1998) Improving the Thermal Stability of Aluminum Films and its Silicon Alloys Using Rapid Heat Treatment. *Vestnik BGU = Newsletter of BSU*. 1 (3), 53–58 (in Russian).
9. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Horushko V. A. (2003) Control of Properties of Thin-Film Systems Using Pulsed Photon Processing. *IFJ = EPJ*. 76 (4), 95–98 (in Russian).
10. Pilipenko V. A., Ponomar V. N., Molofeev V. M., Mikhnyuk A. N., Borzdov V. M. (2003) Modeling the Morphology of Aluminum Films before and after Various Types of Heat Treatment. *IFJ = EPJ*. 76 (4), 99–103 (in Russian).
11. Savchenko A. V., Belyaev A. E., Pilipenko V. A., Petlitskaya T. V., Anishchik V. M., Boltovets N. S., Konakova R. V., Kudrik Ya. Ya., Vinogradov A. O., Sheremet V. N. (2014) Current Transfer via Metal

- Shunts in Ohmic Contacts n⁺-Si]. *Fizika i Tekhnologiya Poluprovodnikov = Physics and Technology of Semiconductors*. 48 (4), 509–514 (in Russian).
12. Sze S. M., Lee M. K. (2012) *Semiconductor Devices: Physics and Technology*. New York, John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited.

Вклад авторов

Пилипенко В. А., Солодуха В. А., Ковальчук Н. С., Соловьёв Я. А., Шестовский Д. В. осуществили постановку задачи для проведения исследования, участвовали в обсуждении результатов.

Пилипенко В. А., Жигулин Д. В. провели изготовление образцов и их измерения, подготовили аналитический обзор по тематике, выполнили анализ и систематизацию полученных результатов, подготовили рукопись этой статьи.

Authors' contribution

Pilipenko V. A., Solodukha V. A., Kovalchuk N. S., Solovjov J. A., Shestovski D. V. carried out the formulation of the task for the research, participated in the discussion of the results.

Pilipenko V. A., Zhyhulin D. V. conducted the preparation of samples and their measurements, prepared an analytical review on the subject, analyzed and systematized the results, prepared the manuscript of this article.

Сведения об авторах

Пилипенко В. А., д.т.н., профессор, член-кор. НАН Беларуси, заместитель директора по научному развитию Государственного центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Солодуха В. А., д.т.н., генеральный директор ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Ковальчук Н. С., к.т.н., доцент, первый зам. главного инженера ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Соловьёв Я. А., к.т.н., доцент, замдиректора филиала «Транзистор» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Шестовский Д. В., инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Жигулин Д. В., начальник сектора физико-технического анализа Государственного центра «Белмикроанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121а
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»
Тел. +375 29 684-43-35
E-mail: zhygulin@mail.ru
Жигулин Дмитрий Владимирович

Information about the authors

Pilipenko V. A., Dr. of Sci. (Tech.), Professor, Corr. Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the “Belmicroanalysis” State Center of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Solodukha V. A., Dr. of Sci. (Tech.), General Director of the JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Kovalchuk N. S., Cand. of Sci., Assistant Professor, First Deputy Chief Engineer of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Solovjov J. A., Cand. of Sci., Assistant Professor, Deputy Director of “Transistor” Branch of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Shestovski D. V., Engineer-Technologist of the Advanced Technological Processes Department of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Zhyhulin D. V., Head of the Sector of Physical and Technical Analysis of the “Belmicroanalysis” State Center of JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa St., 121a
JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company
Tel. +375 29 684-43-35
E-mail: zhygulin@mail.ru
Zhyhulin Dmitry Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-28-35>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 666.3

АП-КОНВЕРСИОННАЯ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИЯ В КСЕРОГЕЛЕ ТИТАНАТА БАРИЯ, ЛЕГИРОВАННОМ ЭРБИЕМ И ИТТЕРБИЕМ, В ПОРИСТОМ АНОДНОМ ОКСИДЕ АЛЮМИНИЯ

Е. И. ЛАШКОВСКАЯ¹, А. В. ГОГА¹, А. Н. ПЛИГОВКА¹, Е. Б. ЧУБЕНКО¹, В. Д. ЖИВУЛЬКО²,
Э. В. МОНАЙКО³, Н. В. ГАПОНЕНКО¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Научно-практический центр Национальной академии наук Беларуси по материаловедению
(г. Минск, Республика Беларусь)

³Технический университет Молдовы (г. Кишинёв, Республика Молдова)

Поступила в редакцию 24.08.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье рассмотрен золь-гель-синтез и люминесцентные свойства титаната бария, легированного эрбием и иттербием ($\text{BaTiO}_3:\text{Er}, \text{Yb}$), в пористом анодном оксиде алюминия. Пористый анодный оксид алюминия с его хорошо известной ячеистой структурой был выбран в качестве матрицы для золь-гель-синтеза $\text{BaTiO}_3:\text{Er}, \text{Yb}$. Пористый анодный оксид алюминия изготавливали на кремниевой пластине и алюминиевой фольге. Раствор, соответствующий составу ксерогеля $\text{Ba}_{0,76}\text{Er}_{0,04}\text{Yb}_{0,20}\text{TiO}_3$, осаждался на пористый анодный оксид алюминия методом центрифугирования с последующей сушкой и термообработкой при относительно низкой температуре 450°C на алюминиевой фольге или при 800°C на кремнии. Пористый анодный оксид алюминия, известный также как оптически анизотропная структура, в эксперименте отличался размером пор и толщиной. По результатам испытаний установлено, что все изготовленные образцы демонстрируют ап-конверсионную люминесценцию эрбия при комнатной температуре при возбуждении диодным модулем в непрерывном режиме сфокусированным излучением лазерного диода на длине волны 980 нм мощностью 200 мВт . Ап-конверсионная люминесценция эрбия характеризуется полосами с максимумом на длинах волн $410, 523, 546$ и 658 нм и соответствующими им переходами ${}^2\text{H}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^2\text{H}_{11/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$, ${}^4\text{S}_{3/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$ и ${}^4\text{F}_{9/2} \rightarrow {}^4\text{I}_{15/2}$.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, ап-конверсия, люминесценция, золь-гель-метод, многослойные структуры, пористый анодный оксид алюминия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарность. Работа выполнена при финансовой поддержке проекта ГКНТ-Молдова Ф22МЛДГ-002; ГПНИ «Фотоника и электроника для инноваций», задание 1.9; ГПНИ «Материаловедение, новые материалы и технологии», задание 2.02, и Национального агентства исследований и разработок Молдовы (проект #22.80013.5007.4VL «Нано- и гетероструктуры на основе оксида цинка и соединений AzB_5 для оптоэлектроники, фотоники и биосенсорики»).

Для цитирования. Лашковская Е. И., Гога А. В., Плиговка А. Н., Чубенко Е. Б., Живулько В. Д., Монайко Э. В., Гапоненко Н. В. Ап-конверсионная люминесценция в ксерогеле титаната бария, легированном эрбием и иттербием, в пористом анодном оксиде алюминия. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 28–35.

UPCONVERSION LUMINESCENCE IN BARIUM TITANATE XEROGEL DOPED WITH ERBIUM AND YTTERBIUM IN POROUS ANODIC ALUMINUM OXIDE

EKATERINA I. LASHKOVSKAYA¹, ALIAKSANDR V. HOHA¹, ANDREI N. PLIGOVKA¹,
EUGENE B. CHUBENKO¹, VADIM D. ZHIVULKO², EDUARD V. MONAICO³,
NIKOLAI V. GAPONENKO¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)

³Technical University of Moldova (Kishinev, Republic of Moldova)

Submitted 24.08.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. In this work, sol-gel synthesis and luminescence properties of erbium and ytterbium doped BaTiO₃ (BaTiO₃:Er,Yb) in porous anodic alumina are reported. Porous anodic alumina with its well-known tailor-made honeycomb structure was chosen as a template for the sol-gel synthesis of BaTiO₃:Er,Yb. Porous anodic alumina was fabricated either on silicon wafer or aluminum foil. The sol corresponding to xerogel content of Ba_{0.76}Er_{0.04}Yb_{0.20}TiO₃ was deposited on porous anodic alumina by spinning, which was followed by drying and heat treatment at a relatively low temperature 450 °C on aluminum foil or 800 °C on silicon. Porous anodic alumina known also as an optically anisotropic structure differed in the experiments by diameter of the pores and thickness. Evidently, all fabricated samples demonstrated a room-temperature erbium upconversion luminescence under excitation in the continuous-wave (CW) mode with a focused 980 nm laser beam of a 200 mW diode module. Erbium upconversion luminescence is characterized by the bands at 410, 523, 546, and 658 nm, corresponding to the ²H_{9/2} → ⁴I_{15/2}, ²H_{11/2} → ⁴I_{15/2}, ⁴S_{3/2} → ⁴I_{15/2} and ⁴F_{9/2} → ⁴I_{15/2}.

Keywords: erbium, ytterbium, upconversion, luminescence, sol-gel method, multilayer structures, porous anodic alumina.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The work was supported financially by the SCNT-Moldova project F22MLDG-002; SPNI “Photonics and electronics for innovation”, task 1.9; SPNI “Materials Science, New Materials and Technologies”, task 2.02, and by National agency for research and development of Moldova under the grant #22.80013.5007.4BL “Nano- and heterostructures based on zinc oxide and A₃B₅ compounds for optoelectronics, photonics and biosensors”.

For citation. Lashkovskaya E. I., Hoha A. V., Pligovka A. N., Chubenko E. B., Zhivulko V. D., Monaico E. V., Gaponenko N. V. Upconversion Luminescence in Barium Titanate Xerogel Doped with Erbium and Ytterbium in Porous Anodic Aluminum Oxide. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 28–35.

Введение

Ап-конверсионная люминесценция наблюдается в материалах, легированных некоторыми трехвалентными лантаноидами – эрбием, тулием, гольмием и неодимом [1, 2]. Сущность эффекта ап-конверсионной люминесценции заключается в поглощении двух и более фотонов меньшей энергии с излучением фотона большей энергии. Для сенсбилизации ап-конверсионной люминесценции эрбия применяется солегирование ионами иттербия, имеющими более высокое сечение поглощения в области 980 нм по сравнению с эрбием. Ап-конверсионная люминесценция используется и исследуется для визуализации лазерного ИК-излучения в медицине, технологиях изготовления солнечных элементов, лазерах.

В некоторых научных публикациях уже была продемонстрирована ап-конверсионная люминесценция эрбия в различных образцах, изготовленных с использованием золь-гель-синтеза титаната бария – порошке, пленочных структурах на кремнии Si/LaNiO₃, Si/SrTiO₃/BaTiO₃:Er и BaTiO₃:Er,Yb, микрорезонаторе на кварцевом стекле SiO₂/BaTiO₃:Er,Yb и мишени BaTiO₃:Er, полученной методом взрывного прессования [3–8]. В данной статье проведено исследование

ап-конверсионной люминесценции эрбия в структурах ксерогель ВаTiO₃:Er,Yb/пористый анодный оксид алюминия (ПАОА).

Ранее в [9–12] была показана интенсивная стоксовая фотолюминесценция (ФЛ) эрбия, тербия и европия в структурах ксерогель/ПАОА. При возбуждении УФ-излучением интенсивность ФЛ тербия и европия возрастает с увеличением как толщины ПАОА, так и количества нанесенных слоев ксерогеля, что, наряду с повышением содержания люминофора на единицу облучаемой поверхности, связано с многократным рассеянием возбуждающего излучения и перераспределением мод излучения в оптически анизотропной структуре ксерогель/ПАОА [9–11]. Интенсивность стоксовой люминесценции эрбия на 1,54 мкм возрастает с увеличением числа нанесенных слоев ксерогеля диоксида титана для длины волны возбуждения 532 нм, для которой обе матрицы – ксерогель диоксида титана и ПАОА – являются достаточно прозрачными [12]. Ап-конверсионная люминесценция эрбия и других лантаноидов в ксерогелях различного состава, в частности ВаTiO₃ в ПАОА, по нашим данным, ранее не исследовалась.

Методика проведения эксперимента

Однослойные и многослойные структуры типа ксерогель/ПАОА были изготовлены с использованием золь титаната бария ВаTiO₃, содержащего эрбий и иттербий в молярном соотношении 1 к 5 для получения ксерогеля состава Ва_{0,76}Er_{0,04}Yb_{0,20}TiO₃. В табл. 1 приведены характеристики образцов, полученные в процессе исследований.

Таблица 1. Характеристики образцов
Table 1. Characteristics of samples

№ образца / Sample No	Толщина ПАОА, мкм / Thickness of PAAO, μm	Диаметр поры, нм / Pore diameter, nm	Подложка / Substrate	Количество слоев ксерогеля / Number of xerogel layers	T _{отжига} , °C / T _{anneal} , °C
1	2,2	20	Кремний / Silicon	8	800
2	1,4	120–150		8	800
3	1,7	240–270		8	800
4	1,5	210–240	Алюминиевая фольга / Aluminium foil	1	450
5	3,0	210–240		1	450
6	7,5	210–240		1	450
7	15,0	210–240		1	450

Золь титаната бария, содержащий компоненты лантаноидов, готовили с использованием изопророксида титана (Ti(OC₃H₇)₄) (97 %, Sigma-Aldrich, Индия), ацетилацетона (CH₃COCH₂COCH₃) (ЧДА, АО «Вектон», Россия), ацетата бария ((Ba(CH₃COO)₂) (ACS reagent 99 %, Sigma-Aldrich, Германия), гидрата ацетата эрбия (Er(CH₃COO)₃·H₂O) (99,9 % trace metal basis, Sigma-Aldrich, США) и гидрата ацетата иттербия (Yb(CH₃COO)₃·H₂O) (99,95 % trace metal basis, Sigma-Aldrich, Россия) по методике [7]. В качестве основания для нанесения ксерогеля использовали ПАОА, сформированный на подложках двух типов – на монокристаллическом кремнии и на алюминиевой фольге. На кремниевой подложке формирование ПАОА осуществляли анодированием тонкой пленки алюминия толщиной 1,5 мкм, нанесенной методом магнетронного распыления на кремниевую пластину *p*-типа с ориентацией поверхности <111>. Анодирование проводилось в специальной двухэлектродной вертикальной электрохимической ячейке из политетрафторэтилена. Электрохимическую ячейку подключали к программируемому источнику тока Keysight N5752A и мультиметру Keysight 34470A в режиме измерения тока, которые управлялись с компьютера при помощи программного обеспечения, разработанного в среде LabView.

Все процессы анодирования проводились при постоянном перемешивании электролита и его начальной температуре 21 °C. Экспериментальные образцы формировали в гальваностатическом режиме при плотности тока 6 мА·см⁻². Первый образец ПАОА на кремнии был сформирован в 0,6 М водном растворе щавелевой кислоты (ЩК), второй и третий ПАОА на кремнии – в 0,6 М водном растворе винной кислоты (ВК) (табл. 1).

Третий образец ПАОА, сформированный в ВК на кремнии, подвергали селективному травлению в 1,1 М водном растворе ортофосфорной кислоты и 0,65 М хромового ангидрида при температуре 62 °С в течение 18 мин. Образцы ПАОА 4–7 (табл. 1) были сформированы на алюминиевой фольге (99,99 %) в 0,6 М водном растворе ВК.

Золь наносили центрифугированием со скоростью 1500 об/мин в течение 30 с, затем сформированные пленки сушили при 150 °С в течение 10 мин. Для образцов 1–3 на кремнии по такому маршруту было подготовлено восемь слоев, после чего образцы подвергали отжигу при 800 °С в течение 30 мин. Для однослойных образцов 4–7 окончательный отжиг проводили при 450 °С в течение 30 мин.

Возбуждение ап-конверсионной люминесценции эрбия в полученных образцах осуществлялось сфокусированным излучением лазерного диода на длине волны 980 нм мощностью 200 мВт в непрерывном режиме. Длина волны этого излучения соответствует полосе поглощения при переходе электронов из основного состояния трехвалентных ионов эрбия $^4I_{15/2}$ во второе возбужденное состояние $^4I_{11/2}$. В качестве детектора для регистрации ап-конверсионной люминесценции видимого диапазона использовали фотоэлектронный умножитель R9110 (Hamamatsu, Япония). Обработку сигналов с фотодетектора проводили с помощью метода синхронного фазового детектирования с автоматической компьютерной регистрацией и обработкой спектров. Морфологию образцов изучали на сканирующем электронном микроскопе S-4800 (Hitachi, Япония).

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1, *a* представлена кинетика формирования ПАОА на кремниевой подложке для образца № 1 (табл. 1). Алюминий толщиной 1,5 мкм образца № 1 был окислен в течение 786 с, что соответствует расчетной толщине ПАОА 2,2 мкм при коэффициенте объемного роста (КОР) для ЩК, равном 1,45 [13]. На рис. 1, *b* показана кинетика формирования ПАОА на кремниевой подложке для образца № 2. Продолжительность анодирования составляла 563 с, что соответствует толщине окисленного алюминия 940 нм и расчетной толщине ПАОА 1,4 мкм при КОР для ВК, равном 1,5 [14]. Продолжительность анодирования третьего образца составляла 680 с, что соответствует толщине окисленного алюминия 1133 нм и расчетной толщине ПАОА 1,7 мкм. Кроме того, для третьего образца проводили расширение пор селективным травлением. Расширение пор было необходимо для лучшего заполнения пор ксерогелем.

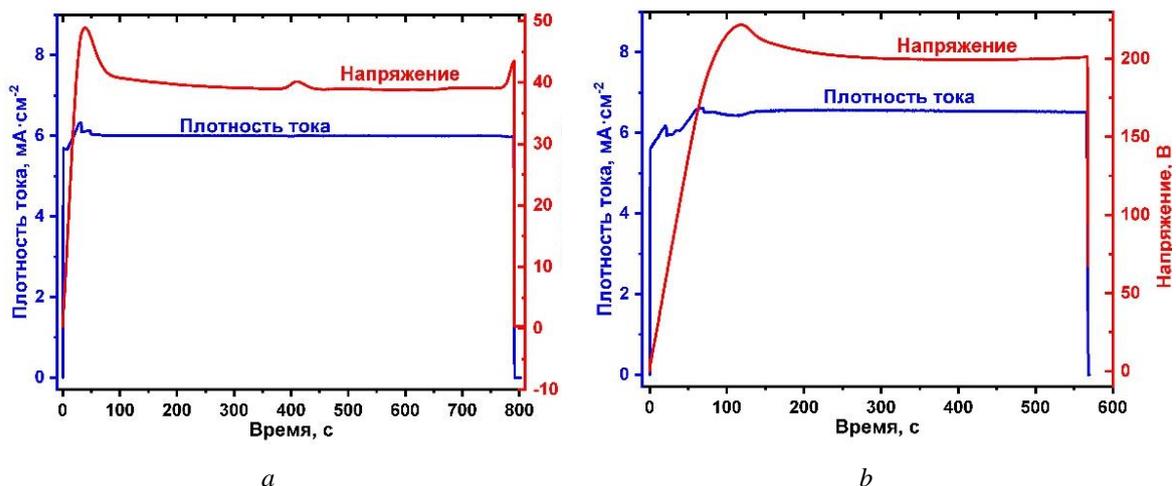


Рис. 1. Кинетика формирования пористого анодного оксида алюминия на кремниевых подложках в 0,6 М водном растворе: *a* – щавелевой кислоты; *b* – винной кислоты

Fig. 1. Porous anodic aluminum oxide current-voltage-time responses on Si wafer formation in an 0,6 M aqueous solution: *a* – of oxalic acid; *b* – of tartaric acid

Анализ кинетических зависимостей позволяет сделать вывод, что для ПАОА, сформированного на алюминиевой фольге, размер пор составляет 210–240 нм. Различный диаметр пор ПАОА для образцов на алюминиевой фольге и кремнии при одинаковых условиях

формирования (образец № 3 и образцы № 4–7 соответственно) объясняется разным исходным алюминием. Так, для ПАОА на фольге характерно более высокое стационарное напряжение анодирования, чем для ПАОА на кремниевой пластине.

На рис. 2 представлены РЭМ-изображения образца № 1 с восьмью слоями ксерогеля титаната бария. ПАОА по всей толщине обладает равномерной, упорядоченной структурой с регулярно расположенными порами, остатков алюминия не наблюдается. Толщина ПАОА соответствует расчетной и составляет ~2,2 мкм. На поверхности ПАОА отчетливо различаются слои ксерогеля равномерной толщины ~200 нм. Анализ поверхности ПАОА на рис. 2, *a* позволяет сделать вывод, что ксерогелю не удалось проникнуть в поры, что объясняется довольно малым диаметром пор (~20 нм) (табл. 1).

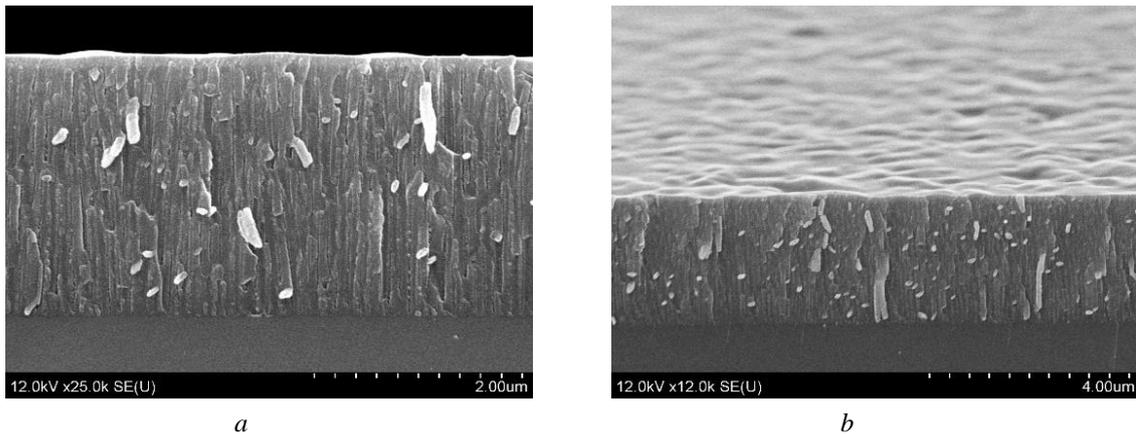


Рис. 2. РЭМ-изображение образца № 1 (табл. 1) с восьмью слоями ксерогеля титаната бария в пористом оксиде алюминия на кремниевой подложке после отжига при температуре 800 °С: *a* – скол; *b* – вид сверху

Fig. 2. SEM image of sample No 1 (Tabl. 1) with 8 layers of barium titanate xerogel in porous anodic aluminum oxide on Si wafer after annealing at 800 °С: *a* – plane view; *b* – cleaved edge

Для всех образцов наблюдались характерные для эрбия полосы ап-конверсионной люминесценции с максимумом на длинах волн 410, 523, 546 и 658 нм, обусловленных переходами $^2H_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^2H_{11/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$, $^4S_{3/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ и $^4F_{9/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ (рис. 3). Ап-конверсионная люминесценция для длины волны возбуждения 980 нм может быть обусловлена как поглощением одним ионом эрбия из возбужденного состояния, так и ион-ионным взаимодействием лантаноидов с участием иттербия как иона-сенситизатора (рис. 4). Существенно, что ап-конверсионная люминесценция наблюдается даже на структурах ксерогель / ПАОА, приготовленных на алюминиевой фольге, т. е. после термообработки при температуре 450 °С. В отличие от стоксовой люминесценции тербия и европия [9], для структур, содержащих один слой ксерогеля, интенсивность ап-конверсионной люминесценции не увеличивается с увеличением толщины ПАОА, а наоборот, убывает (рис. 3, графики 4–7). Значительное восьмикратное увеличение ап-конверсионной люминесценции наблюдается для структур с ПАОА меньшей толщины, но подвергнутых термообработке при более высокой температуре (800 °С) и содержащих восемь слоев ксерогеля (рис. 3, графики 1–3). При этом более интенсивная ап-конверсионная люминесценция наблюдается для ПАОА с диаметром пор 120–150 нм (рис. 3, сравнить график 2 с графиками 1, 3).

По мнению авторов статьи, многократное рассеяние возбуждающего излучения в структурах ксерогель/ПАОА для длины волны 980 нм не столь существенно для усиления ап-конверсионной люминесценции в рассматриваемых структурах, как для ультрафиолетового диапазона при возбуждении тербия и европия. Увеличение интенсивности ап-конверсионной люминесценции при повышении температуры отжига для ксерогеля титаната бария наблюдалось и в микрорезонаторе $BaTiO_3/SiO_2$, что может быть связано с уплотнением структуры ксерогеля и увеличением коэффициента поглощения в области возбуждения [7, 15]. Кроме этого, повышение температуры отжига уменьшает концентрацию гидроксильных групп, ослабляющих ап-конверсионную люминесценцию лантаноидов.

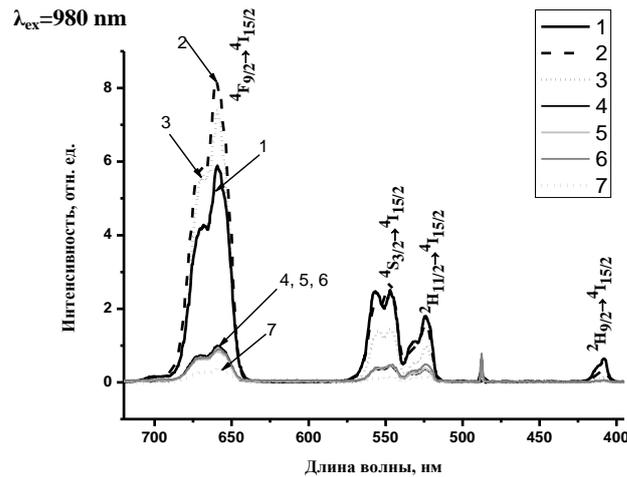


Рис. 3. Спектры ап-конверсионной люминесценции для образцов ксерогель $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})/\text{пористый}$ анодный оксид алюминия (длина волны возбуждения 980 нм): 1–3 – на кремниевой подложке с восьмью слоями ксерогеля и $T_{\text{отжига}} = 800^\circ\text{C}$; 4–7 – на алюминиевой фольге с одним слоем ксерогеля и $T_{\text{отжига}} = 450^\circ\text{C}$

Fig. 3. Upconversion luminescence spectra for $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})/\text{porous}$ anodic alumina xerogel samples (excitation wavelength 980 nm): 1–3 – on silicon substrate with 8 xerogel layers annealed at $T_{\text{anneal}} = 800^\circ\text{C}$; 4–7 – on aluminum foil with 1 xerogel layer annealed at $T_{\text{anneal}} = 450^\circ\text{C}$

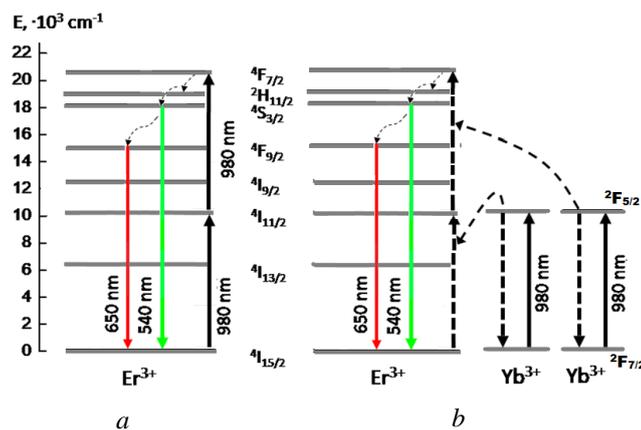


Рис. 4. Диаграмма энергетических уровней, демонстрирующая механизмы ап-конверсионной люминесценции при возбуждении на длине волны 980 нм: *a* – поглощение ионом эрбия из возбужденного состояния; *b* – ап-конверсионный перенос энергии между ионами в материале, легированном эрбием и иттербием [7]

Fig. 4. Energy level diagram demonstrating the mechanisms of upconversion PL under excitation at a wavelength of 980 nm: *a* – absorption by one erbium ion from the excited state; *b* – energy transfer upconversion in the material doped with erbium and ytterbium [7]

Заключение

Показана ап-конверсионная люминесценция трехвалентных ионов эрбия в видимом диапазоне при возбуждении на длине волны 980 нм в ксерогелях $\text{BaTiO}_3:(\text{Er}, \text{Yb})/\text{пористый}$ анодный оксид алюминия после термообработки при температуре 450 и 800 °С. Ап-конверсионную люминесценцию демонстрируют структуры, сформированные как на алюминии, так и на кремнии. Наиболее интенсивную ап-конверсионную люминесценцию показывают образцы, содержащие восемь слоев ксерогеля и подвергнутые термообработке при 800 °С. Ап-конверсионная люминесценция характеризуется полосами излучения в диапазоне 400–700 нм с наиболее интенсивной полосой перехода трехвалентного эрбия $4\text{F}_{9/2} \rightarrow 4\text{I}_{15/2}$ с максимумом на длине волны 658 нм. Подобные структуры представляют интерес для пленочных визуализаторов ИК-излучения, в частности, лазеров с длиной волны генерации 980 нм, для люминесцентных изображений на алюминии и его сплавов с целью защиты от подделки [16] и преобразователей

для тыльной стороны солнечных элементов, прозрачных в ближнем ИК-диапазоне. Кроме этого, образцы пористого анодного оксида алюминия с размерами пор 90 нм и более, содержащие однократно нанесенный слой ксерогеля, как правило, оставляют устья пор открытыми [17], что обеспечивает возможность для проникновения в них жидкостей и может быть использовано в технологии мезо- и макропористых материалов для фотокаталитической очистки воды при облучении ИК-излучением.

Список литературы / References

1. Goldschmidt J. C., Fischer S. (2015) Upconversion for Photovoltaics – a Review of Materials, Devices and Concepts for Performance Enhancement. *Advanced Optical Materials*. 3 (4), 510–535. DOI: 10.1002/adom.201500024.
2. Gusakova N. V., Kurilchik S. V., Yasukevich A. S., Kisel V. E., Dashkevich V. I., Orlovich V. A., Pavlyuk A. A., Vatnik S. M., Bagaev S. N., Kuleshov N. V. (2018) Spectroscopy and Microchip Laser Operation of Tm, Ho:KYW Crystals with Different Ho Concentrations. *Laser Physics Letters*. 15 (2), 025001. DOI: 10.1088/1612-202X/aa9972.
3. Ghosh P., Sadhu S., Sen T., Patra A. (2008) Upconversion Emission of BaTiO₃:Er Nanocrystals. *Bulletin of Materials Science*. 31 (3), 461–465. DOI: 10.1007/s12034-008-0072-7.
4. Meneses-Franco A., Campos-Vallette M., Vásquez S. O., Soto-Bustamante E. A. (2018) Er-Doped Nanostructured BaTiO₃ for NIR to Visible Upconversion. *Materials (Basel)*. 11 (10), 1950. DOI: 10.3390/ma11101950.
5. Chen L., Wei X.-H., Fu X. (2012) Effect of Er Substituting Sites on Upconversion Luminescence of Er³⁺-Doped BaTiO₃ Films. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China (English Edition)*. 22 (5), 1156–1160. DOI: 10.1016/S1003-6326(11)61299-5.
6. Rudenko M. V., Gaponenko N. V., Chubenko E. B., Lashkovskaya E. I., Shustsikava K. V., Radyush Yu. V., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Wang M., Monaico E. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N. (2022) Erbium Upconversion Luminescence from Sol-Gel Derived Multilayer Porous Inorganic Perovskite Film. *Journal of Advanced Dielectrics*. 12 (2), 2150031. DOI: 10.1142/S2010135X21500314.
7. Lashkovskaya E. I., Gaponenko N. V., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Andreev B. A., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Martynov I. L., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Labunov V. A., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A., Timoshenko V. Yu. (2022) Optical Properties and Upconversion Luminescence of BaTiO₃ Xerogel Structures Doped with Erbium and Ytterbium. *Gels*. 8 (6), 347. DOI: 10.3390/gels8060347.
8. Gaponenko N. V., Sudnik L. V., Vityaz P. A., Luchanok A. R., Stepikhova M. V., Yablonskiy A. N., Lashkovskaya E. I., Shustsikava K. V., Radyush Yu. V., Zhivulko V. D., Mudryi A. V., Kazuchits N. M., Rusetsky M. S. (2022) Upconversion luminescence of Er³⁺ Ions from Barium Titanate Xerogel Powder and Target Fabricated by Explosive Compaction Method. *Journal of Applied Spectroscopy*. 89 (2), 184–190. DOI: 10.1007/s10812-022-01349-x.
9. Gaponenko N. V. (2007) Luminescence of Lanthanides from Xerogels Embedded in Mesoporous Matrices. *Acta Physica Polonica A*. 112 (5), 737–749. DOI: 10.12693/APhysPolA.112.737.
10. Gaponenko N. V., Molchan I. S., Gaponenko S. V., Mudryi A. V., Lyutich A. A., Misiewicz J., Kudrawiec R. (2003) Luminescence of Eu³⁺ and Tb³⁺ Ions in the Structure Microporous Xerogel/Mesoporous Anodic Aluminum Oxide. *Journal of Applied Spectroscopy*. 70 (1), 59–64. DOI: 10.1023/A:1023268324339.
11. Lutich A. A., Gaponenko S. V., Gaponenko N. V., Molchan I. S., Sokol V. A., Parkhutik V. (2004) Light Scattering in Nanoporous Materials: a Photon Density of States Effect. *Nano Letters*. 4 (9), 1755–1758. DOI: 10.1021/nl049620e.
12. Gaponenko N. V., Molchan I. S., Tsyrukunov D. A., Maliarevich G. K., Aegerter M., Puetz J., Al-Dahoudi N., Misiewicz J., Kudrawiec R., Lambertini V., Pira N. Li, Repetto P. (2005) Optical and Structural Properties of Sol-Gel Derived Materials Embedded in Porous Anodic Alumina. *Microelectronic Engineering*. 81 (2), 255–261. DOI: 10.1016/j.mee.2005.03.016.
13. Sulka G. D. (2008) Highly Ordered Anodic Porous Alumina Formation by Self-Organized Anodizing. *Nanostructured Materials in Electrochemistry*. 1, 1–116. DOI: 10.1002/9783527621507.ch1.
14. Sarganov V. F., Gorokh G. G. (1993) Anodic Oxide Cellular Structure Formation on Aluminum Films in Tartaric Acid Electrolyte. *Materials Letters*. 17, 121–124. DOI: 10.1016/0167-577X(93)90069-A.
15. Gaponenko N. V., Kholov P. A., Karnilava Yu. D., Lashkovskaya E. I., Labunov V. A., Martynov I. L., Osipov E. V., Chistyakov A. A., Kargin N. I., Raichenok T. F., Tikhomirov S. A. (2021) Sol-Gel Derived Photonic Crystals BaTiO₃/SiO₂. *Semiconductors*. 55 (11), 831–834. DOI: 10.1134/S1063782621100110.
16. Gaponenko N. V., Orekhovskaya T. I., Meledina M. V., Prislowsky S. Ya., Gaponenko S. V., Tsirkunov D. A., Borisenko V. E., Turtsevich A. S. (2011) Method for Forming a Pattern for Obtaining a Luminescent Image on an Aluminum Surface: Patent No a20091888 of Rep. Belarus. Publ. 07.13.2011 (in Russian).
17. Gaponenko N. V., Orekhovskaya T. I., Nikolaenko I. A., Linnik O. P., Zhukovskii M. A., Smirnova N. P., Prislowskii S. Ya. (2010) Titanium Oxide Xerogel Films in Porous Aluminum Oxide for Photocatalytic Application. *Journal of Applied Spectroscopy*. 77 (3), 432–436. DOI: 10.1007/s10812-010-9350-4.

Вклад авторов

Лашковская Е. И. отработала методику формирования золя и выполнила синтез пленок ксерогелей титаната бария.

Гога А. В. приготовил образцы пористого анодного оксида алюминия.

Плиговка А. Н. отработал режимы анодирования, принял участие в обработке и интерпретации результатов исследований.

Чубенко Е. Б. принял участие в обсуждении результатов и подготовки рукописи статьи.

Живулько В. Д. выполнил люминесцентный анализ образцов.

Монайко Э. В. принял участие в обсуждении результатов и подготовки рукописи статьи.

Гапоненко Н. В. определил цели и задачи исследования, подготовил рукопись статьи.

Authors' contribution

Lashkovskaya E. I. worked out a method of forming film-forming sols and performed the synthesis of barium titanate xerogel films. Hoha A. V. prepared samples of porous anodic aluminum oxide. Pligovka A. N. worked out the modes of anodizing, took part in the processing and interpretation of the research results. Chubenko E. B. participated in the discussion of the results and preparation of the manuscript of the article. Zhivulko V. D. performed luminescent analysis of samples. Monaico E. V. participated in the discussion of the results and preparation of the manuscript of the article. Gaponenko N. V. defined the objectives of the research and prepared the manuscript of the article.

Сведения об авторах

Лашковская Е. И., инженер НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гога А. В., стажер, младший научный сотрудник НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Плиговка А. Н., к.т.н., старший научный сотрудник НИЛ 4.10 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чубенко Е. Б., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Живулько В. Д., к.ф.-м.н., заведующий лабораторией Научно-практического центра Национальной академии наук Беларуси по материаловедению.

Монайко Э. В., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Национального центра по изучению и тестированию материалов Технического университета Молдовы.

Гапоненко Н. В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий НИЛ 4.5 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Lashkovskaya E. I., Engineer of R&D Laboratory 4.5 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hoha A. V., Junior Researcher at R&D Laboratory 4.10 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pligovka A. N., Cand. of Sci., Senior Researcher at R&D Laboratory 4.10 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Chubenko E. B., Cand. of Sci., Associated Professor, Leading Researcher of R&D Laboratory 4.3 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zhivulko V. D., Cand. of Sci., Head of the Laboratory of Scientific-Practical Materials Research Centre of National Academy of Sciences of Belarus.

Monaico E. V., Cand. of Sci., Leading Researcher at the National Center for Materials Study and Testing of Technical University of Moldova.

Gaponenko N. V., Dr. Sci, Professor, Head of R&D Laboratory 4.5 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 17 293-88-75
E-mail: gaponenko@bsuir.by
Гапоненко Николай Васильевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 17 293-88-75
E-mail: gaponenko@bsuir.by
Gaponenko Nikolai Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-36-42>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 621.3.049.774

МНОГОСЛОЙНЫЕ СИСТЕМЫ МЕТАЛЛИЗАЦИИ СУБМИКРОННЫХ ИНТЕГРАЛЬНЫХ СХЕМ

В. В. ЕМЕЛЬЯНОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 19.07.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Создание многоуровневой системы межсоединений в субмикронных интегральных схемах позволяет уменьшить электрическое сопротивление токопроводящих дорожек, паразитную емкость между проводниками и ускорить быстродействие приборов микроэлектроники. Предлагается формировать поперечный профиль токоведущих дорожек системы многослойной системы металлизации в форме равнобоковой трапеции с углами при нижнем основании, равными 75° – 85° . Оптимальные углы наклона боковых поверхностей токоведущих дорожек обеспечиваются предлагаемыми режимами плазмохимического травления пленки на основе сплава алюминия. Травление пленки сплава на основе алюминия проводят в плазме газовой смеси BCl_3 , Cl_2 и N_2 при давлении 150–250 мТорр, плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см² со следующим содержанием компонентов, об. %: BCl_3 – 50–65; Cl_2 – 25–35; N_2 – остальное.

Ключевые слова: субмикронная интегральная схема, многослойная токопроводящая система, алюминиевая металлизация.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Емельянов В. В. Многослойные системы металлизации субмикронных интегральных схем. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 36–42.

MULTILAYER METALLIZATION SYSTEMS OF SUBMICRON INTEGRATED CIRCUITS

VICTOR V. EMEL'YANOV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 19.07.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The creation of a multilevel system of interconnections in submicron integrated circuits makes it possible to reduce the electrical resistance of conductive tracks, parasitic capacitance between conductors, and increase the speed of microelectronic devices. It is proposed to form a transverse profile of the current-carrying tracks of a multilayer metallization system in the form of an isosceles trapezoid with angles at the lower base equal to 75° – 85° . Etching of an aluminum-based alloy film is carried out in a plasma gas mixture of BCl_3 , Cl_2 , and N_2 at the pressure of 150–250 mTorr and power density of 1.6–2.2 W/cm², with the following component content, vol. %: BCl_3 – 50–65; Cl_2 – 25–35; N_2 – the rest.

Keywords: submicron integrated circuit, multilayer conductive system, aluminum metallization.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Emelyanov V. V. Multilayer Metallization Systems of Submicron Integrated Circuits. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 36–42.

Введение

Уменьшение размеров активных элементов субмикронных интегральных схем (ИС) и обусловленное этим повышение степени интеграции привело к тому, что все большая площадь кристалла оказывается занятой электрическими межсоединениями [1]. Увеличение длины межсоединений при одновременном уменьшении их поперечного сечения приводит к значительному повышению электрического сопротивления и емкости, в результате чего сильно ограничивается быстродействие приборов. Одним из возможных решений данной проблемы является создание многоуровневых межсоединений. В свою очередь, многоуровневая система породила множество других проблем, основные из которых – обрыв токоведущих дорожек и нарушение сплошности диэлектрических пленок на ступеньках топологического рельефа. В связи с этим значительные усилия исследователей направлены на планаризацию топологического микрорельефа ИС.

Уменьшение топологических размеров элементов полупроводниковых приборов и рост степени интеграции ИС, в том числе с целью экономии площади кристаллов на пластинах монокристаллического кремния, приводят к значительному увеличению в применяемых в приборах металлических пленках градиентов механических напряжений. Релаксация механических напряжений в таких многослойных структурах протекает преимущественно через изменение размера зерна металлической пленки, сопровождаемое стресс-миграцией атомов алюминия (массоперенос материала пленки под действием механических напряжений) [2]. Наличие развитого рельефа ИС способствует увеличению градиентов механических напряжений и усилению стресс-миграции в системах межсоединений. Это приводит к возникновению дефектов металлической пленки в виде аномально больших зерен и полостей, являющихся причиной коротких замыканий и обрывов и в итоге отказов функционирования ИС [3]. В современных ИС в качестве диэлектрических слоев наиболее широко применяются неорганические пленки на основе диоксида кремния, формируемые из газовой фазы. Для межуровневой диэлектрической изоляции при этом преимущественно используются оплаваемые стекла, в частности, фосфоросиликатное стекло (ФСС), боросиликатное стекло (БСС) или борофосфоросиликатное стекло (БФСС), которые наряду с планаризацией микрорельефа за счет оплавления служат также хорошими ловушками для щелочных и щелочноземельных металлов.

Использование газофазного осаждения пленки на основе диоксида кремния (в данном случае – плазмохимического осаждения) позволяет наиболее полно заполнить топологический микрорельеф между дорожками металлизации [4]. В статье рассмотрено формирование поперечного профиля токоведущих дорожек системы многослойной системы металлизации в форме равнобокой трапеции с углами при нижнем основании, равными 75° – 85° . Оптимальные углы наклона боковых поверхностей токоведущих дорожек обеспечиваются предлагаемыми режимами плазмохимического травления пленки на основе сплава алюминия. Травление пленки сплава на основе алюминия проводят в плазме газовой смеси BCl_3 , Cl_2 и N_2 при давлении 150–250 мТорр и плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см².

Методика травления пленки алюминия

Для обеспечения субмикронных проектных норм в производстве интегральных схем формирование поперечного профиля токоведущих дорожек проводили в форме равнобокой трапеции с углами при нижнем основании, равными 75° – 85° . Это способствует устранению эффекта экранирования при последующем осаждении диэлектрика, предотвращению его преимущественного роста в верхней части канавок между дорожками и полному заполнению

углублений топологического рельефа материалом диэлектрика и далее материалом последующего слоя.

Выбор угла наклона боковых стенок токоведущих дорожек основан как на устранении эффекта экранирования, так и на минимизации полезной площади, занимаемой металлизацией. При углах наклона более 85° , например 88° , вследствие неперпендикулярности потока осаждаемых частиц диэлектрика рабочей поверхности полупроводниковой пластины наблюдается появление отдельных полостей в диэлектрике. Углы наклона менее 75° , например 65° , требуют уже заметного увеличения площади металлизации без снижения ее электрического сопротивления, что является нерациональным.

Травление пленки сплава на основе алюминия в предлагаемых режимах обеспечивает формирование поперечного профиля токоведущих дорожек в форме равнобокой трапеции, нижнее основание которой немного больше верхнего, а прилегающие углы при нижнем основании этой трапеции являются острыми и составляют упомянутые 75° – 85° . Такой профиль травления принято считать положительным.

Установленные оптимальные углы наклона боковых поверхностей токоведущих дорожек обеспечиваются предлагаемыми режимами плазмохимического травления пленки на основе сплава алюминия. Хлор является основным реагентом, обеспечивающим травление алюминия с образованием летучего хлорида алюминия. Однако в связи с тем, что алюминий всегда оказывается защищенным тонкой пленкой собственного оксида, для разрушения последнего используют хлорид бора. Азот в составе газовой смеси играет роль разбавителя для обеспечения требуемой концентрации активных ионов и радикалов при их заданной энергии. Если для травления используется минимальное значение давления газовой смеси, то азот может быть исключен из рабочей атмосферы. Содержание BCl_3 в этом случае составляет 65 об.%, а Cl_2 – 35 об.%. Однако при повышении давления даже до 200 мТорр содержание азота должно быть увеличено хотя бы до 5 об.% за счет пропорционального уменьшения содержания BCl_3 и Cl_2 , в противном случае возникает риск появления растратов металлизации. В зависимости от особенностей топологического рисунка металлизации в ряде случаев управление скоростью его травления достигается добавлением до 30 об.% азота, регулирующего концентрацию активных радикалов плазмы.

Выбор плотности мощности плазмы и рабочего давления в камере основан на экспериментальных данных [5]. При плотности мощности менее $1,6 \text{ Вт/см}^2$ существенно снижаются анизотропия процесса и скорость травления до уровня, менее технологически допустимого. Увеличение же плотности мощности более $2,2 \text{ Вт/см}^2$ приводит к повышению скорости травления защитной маски фоторезиста без сопутствующего повышения скорости травления алюминия, т. е. к снижению селективности и искажению формируемого топологического рисунка. Рабочее давление выбирают в каждом конкретном случае отдельно в зависимости от состава газовой смеси и электрических характеристик разряда.

На рис. 1, а показано поперечное сечение токопроводящей системы первого уровня в составе ИС, полученной по существующей технологии, на рис. 1, б – по предлагаемой технологии. Из приведенных фото видно, что на поверхности полупроводниковой пластины с активными элементами 1 последовательно сформированы первый уровень диэлектрика 2, первый уровень разводки, представленный дорожками металлизации первого уровня 3, второй уровень диэлектрика, образованный первым слоем второго уровня диэлектрика 4, выполненным из пиролитического среднетемпературного диоксида кремния (СТО), и вторым слоем второго уровня диэлектрика 5, выполненным из плазмохимического диоксида кремния (ПХО).

Вследствие эффекта экранирования при формировании системы металлизации по способу-прототипу второй слой второго уровня диэлектрика 5 над канавкой между дорожками металлизации первого уровня 3 практически смыкается с образованием скрытой полости 6. При напылении слоя металла для формирования металлизации второго уровня в таких местах образуются дефекты пленки металла 7 (рис. 2).

Выбор угла наклона боковых стенок дорожек металлизации α из интервала 75° – 85° , формируемого за счет заявляемых режимов плазмохимического травления сплава на основе алюминия, обеспечивает отсутствие в системе металлизации скрытых полостей и, соответственно, возникающих по этой причине дефектов пленки металла, приводящих к браку.

Таким образом, при использовании предлагаемой технологии изготовления системы металлизации ИС ее качество улучшается за счет предупреждения образования дефектов, а выход годных приборов увеличивается.

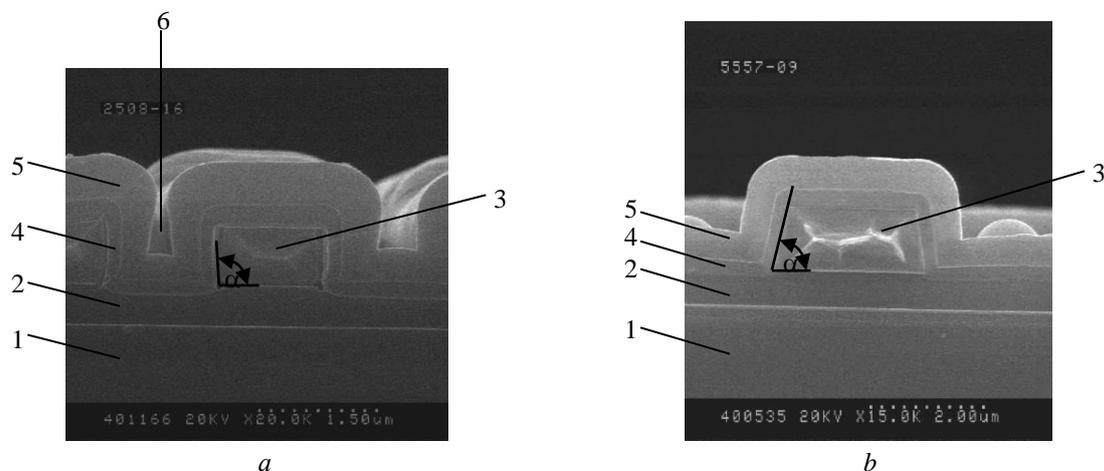


Рис. 1. РЭМ-фото поперечного сечения токопроводящей системы первого уровня в составе интегральной схемы, полученной по существующей (а) и предлагаемой (б) технологии: 1 – полупроводниковая пластина с активными элементами; 2 – первый уровень диэлектрика; 3 – дорожки металлизации первого уровня; 4 – первый слой второго уровня диэлектрика; 5 – второй слой второго уровня диэлектрика; 6 – скрытая полость; α – угол наклона боковых стенок дорожек металлизации

Fig. 1. SEM photo of the cross-section of the current-carrying system of the first level as part of an integrated circuit, obtained using the existing (a) and proposed (b) technology: 1 – semiconductor wafer with active elements; 2 – the first level of the dielectric; 3 – metallization tracks of the first level; 4 – the first layer of the second level of the dielectric; 5 – the second layer of the second level of the dielectric; 6 – hidden cavity; α – angle of inclination of the side walls of the metallization tracks

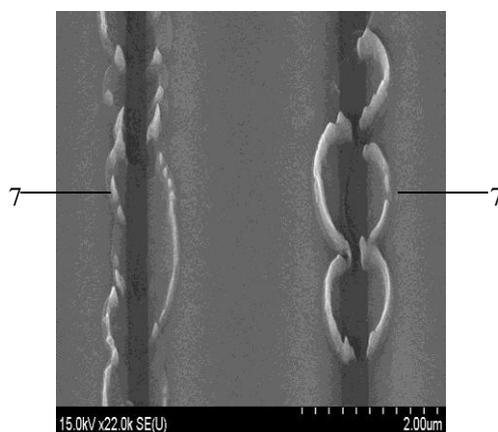


Рис. 2. РЭМ-фото дефектов поверхности пленки металла (7) второго уровня в структуре, полученной по существующей технологии

Fig. 2. SEM photo of defects in the surface of a metal film (7) of the second level in the structure obtained by the existing technology

Формирование многослойных систем металлизации

Активные элементы структуры ИС формировали стандартными методами в соответствии с требованиями действующей технической документации. После этого на пластинах формировали первый уровень диэлектрика, содержащий слои термического диоксида кремния, нитрида кремния и ПХО суммарной толщиной 0,45 мкм. Затем методом фотолитографии и плазмохимического травления в первом уровне диэлектрика вскрывали контактные окна к активным элементам. После зачистки контактных окон от естественного диоксида кремния для формирования металлизации первого уровня на пластины напыляли

пленку сплава Al + 1 % Si толщиной 0,8 мкм. Стандартными методами фотолитографии формировали фоторезистивную маску и проводили плазмохимическое травление сплава на основе алюминия. Режимы травления и характеристики структур приведены в табл. 1.

Таблица 1. Влияние режимов травления сплава на основе алюминия на характеристики структур
Table 1. Influence of etching modes of an aluminum-based alloy on the characteristics of structures

№ п/п / Equential number	Давление в рабочей камере, мТорр / Pressure in the working chamber, mTorr	Плотность мощности, Вт/см ² / Power density, W/cm ²	Содержание, об.% / Content, vol.%			Угол наклона боковых стенок токоведущих дорожек, град / Angle of inclination of the side walls of the current-carrying tracks, deg	Выход годных кристаллов, % / Yield of good crystals, %	Примечание / Note
			BCl ₃	Cl ₂	N ₂			
1	120	2,0	55	30	15	70°	81	–
2	150	2,0	55	30	15	75°	89	–
3	200	2,0	55	30	15	80°	92	–
4	250	2,0	55	30	15	85°	91	–
5	300	2,0	55	30	15	88°	69	Дефекты металлизации второго уровня / Metallization defects of the second level
6	200	1,2	55	30	15	73°	73	–
7	200	1,6	55	30	15	80°	91	–
8	200	2,2	55	30	15	80°	92	–
9	200	2,5	55	30	15	87°	74	–
10	200	2,0	45	30	25	85°	45	Невытравлен- ные остатки металла / Uncorroded metal residue
11	200	2,0	50	30	20	85°	93	–
12	200	2,0	65	30	5	80°	92	–
13	200	2,0	70	30	0	70°	70	Растрав слоя металлизации / Rasterization of the metallization layer
14	200	2,0	55	20	25	65°	71	–
15	200	2,0	55	25	20	80°	94	–
16	200	2,0	55	35	10	80°	92	–
17	200	2,0	55	40	5	90°	78	Дефекты металлизации второго уровня / Metallization defects of the second level
18	150	1,6	65	35	0	80°	85	–
19	200	2,0	50	25	25	80°	92	–
20	200	2,0	45	25	30	70°	82	–
21	Существующий процесс / Existing process					90°	76	Дефекты металлизации второго уровня / Metallization defects of the second level

Далее на пластинах формировали следующий уровень диэлектрической изоляции, состоящий из слоев СТО и ПХО суммарной толщиной $D_2 = 0,9$ мкм. После формирования контактных окон на поверхность пластин напыляли пленку алюминия с добавкой 1 % кремния толщиной 1,4 мкм и создавали фоторезистивную маску второго уровня металлизации. Травление пленки сплава на основе алюминия для получения второго уровня разводки осуществляли в плазме при тех же режимах, что и для металлизации первого уровня. Тестовые структуры, сформированные в одном технологическом цикле с рабочими, после данной операции были переданы для электронно-микроскопических исследований профиля травления. Затем формировали пассивирующее покрытие требуемой топологической конфигурации и проводили термообработку структур при температуре 450 °С в течение 20 мин в атмосфере азота и водорода.

Выполняли контроль функционирования полученных структур. Результаты анализа контроля функционирования токопроводящих структур в табл. 1 показали, что предлагаемая технология изготовления многослойной системы металлизации ИС обеспечивает гораздо больший выход годных приборов за счет повышения качества токопроводящей пленки сплава Al + 1 % Si.

Заключение

В технологическом процессе изготовления системы металлизации интегральных схем, включающем формирование на полупроводниковой подложке с активными элементами первой межуровневой диэлектрической изоляции требуемой топологической конфигурации, напыление первой пленки сплава на основе алюминия, формирование фоторезистивной маски металлизации первого уровня, травление первой пленки сплава на основе алюминия, удаление фоторезистивной маски, формирование второй межуровневой диэлектрической изоляции требуемой топологической конфигурации, напыление второй пленки сплава на основе алюминия, формирование фоторезистивной маски металлизации второго уровня, травление второй пленки сплава на основе алюминия, удаление фоторезистивной маски, формирование пассивирующего покрытия требуемой топологической конфигурации и термообработку для обеспечения омических контактов между уровнями электрической разводки, травление пленки сплава на основе алюминия проводят в плазме газовой смеси BCl_3 , Cl_2 и N_2 при давлении 150–250 мТорр, плотности мощности 1,6–2,2 Вт/см² со следующим содержанием компонентов, об. %: BCl_3 – 50–65; Cl_2 – 25–35; N_2 – остальное. В результате предлагаемого процесса происходит формирование поперечного профиля токоведущих дорожек в форме равнобокой трапеции с положительным наклоном.

Список литературы

1. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.], под ред. А. П. Достанко. Минск: Беларус. навука, 2020. 260 с.
2. Емельянов, В. В. Повышение устойчивости к стресс-миграции пленочных структур на основе алюминия в микроэлектронике / В. В. Емельянов // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2020. № 1. С. 152–159.
3. Емельянов, В. В. Многослойные токопроводящие пленки на основе алюминия для полупроводниковых приборов и интегральных микросхем / В. В. Емельянов, В. А. Емельянов, В. В. Баранов // Весці Нацыянальнай акадэміі навук Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. 2020. Т. 65, № 2. С. 170–176.
4. Турцевич, А. С. Формирование из газовой фазы функциональных слоев интегральных микросхем / А. С. Турцевич, В. А. Емельянов. Минск: Интегралполиграф, 2007. 224 с.
5. Григорьев, Ф. И. Плазмохимическое и ионное химическое травление в технологии микроэлектроники / Ф. И. Григорьев. М.: МГИЭИМ, 2003. 48 с.

References

1. Dostanko A. P. et al. (2020) *Innovative Technologies and Equipment of Submicron Electronics*. Minsk: Belarusian Science Publ. 260 (in Russian).
2. Emelyanov V. V. (2020) Increasing the Resistance to Stress Migration of Film Structures Based on Aluminum in Microelectronics. *Electronics: Science, Technology, Business*. (1), 152–159 (in Russian).
3. Emelyanov V. V., Emelyanov V. A., Baranov V. V. (2020) Multilayer Conductive Films Based on Aluminum for Semiconductor Devices and Integrated Circuits. *Vestsi Natsiyanal'nai Akademii Navuk Belarusi. Ser. Phis.-Techn. Navuk*. 65 (2), 170–176 (in Russian).
4. Turtsevich A. S., Emelyanov V. V. (2007) *Formation of Functional Layers of Integrated Circuits from the Gas Phase*. Minsk, Integralpolygraph Publ. 224 (in Russian).
5. Grigoriev F. I. (2003) *Plasma-Chemical and Ion-Chemical Etching in Microelectronic Technology*. Moskov, MGIEiM Publ. 48 (in Russian).

Сведения об авторе

Емельянов В. В., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Emelyanov V. V., Postgraduate at the Department of Electronic Engineering and Technology of the Belarusian University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. + 375 29 688-75-76
E-mail: emeljnov@bk.ru
Емельянов Виктор Викторович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. + 375 29 688-75-76
E-mail: emeljnov@bk.ru
Emelyanov Viktor Viktorovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-43-47>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2/.3

УЛУЧШЕНИЕ СТАТИСТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК АППАРАТНОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ ПРОГРАММНЫМ СПОСОБОМ

М. О. ПИКУЗА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 16.09.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В качестве источника случайных чисел часто применяют аппаратные генераторы случайных чисел, работа которых основана на хаотически изменяющихся параметрах различных физических процессов. Статистические характеристики таких генераторов не всегда позволяют использовать их в сфере защиты информации. Для совершенствования этих показателей используют различные программные средства обработки выходных данных генератора. Исследована возможность улучшения статистических характеристик аппаратного генератора случайных чисел программным способом. Данный генератор построен на основе шумового диода ND103L и на выходе имеет случайную цифровую последовательность двоичных чисел. С целью совершенствования статистических характеристик выходной поток случайных чисел обрабатывался при помощи программного метода, основанного на вычислении конечных разностей высокого порядка. Данный метод позволяет получить более симметричное распределение случайных чисел, а также увеличить скорость их генерации. После обработки данные с исследуемого генератора имели лучшие статистические характеристики, что подтверждено тестами NIST и Diehard, также скорость генерации увеличилась более чем в пять раз. Результаты выполненных исследований могут быть полезны разработчикам аппаратных генераторов случайных чисел, которым требуется улучшить характеристики генератора.

Ключевые слова: аппаратный генератор случайных чисел, шумовой диод, набор статистических тестов, NIST, Diehard, конечная разность высокого порядка.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пикюза М. О. Улучшение статистических характеристик аппаратного генератора случайных чисел программным способом. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 43–47.

STATISTICAL CHARACTERISTICS IMPROVEMENT OF A HARDWARE RANDOM NUMBER GENERATOR BY A SOFTWARE METHOD

MAKSIM O. PIKUZA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 16.09.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. As a source of random numbers, hardware random number generators are often used, the operation of which is based on randomly changing parameters of various physical processes. The statistical characteristics of such generators do not always allow their use in the field of information security. To improve the statistical characteristics, various software tools for processing the output data of the generator are used. The purpose of this work is to study the possibility to improve the statistical characteristics of a hardware random number generator by software. The investigated hardware random number generator is based on the ND103L noise diode and has a random digital sequence of binary numbers at the output. To improve the statistical characteristics, the output stream of random numbers was processed using a software method based on the calculation of high-order finite differences. This method would allow one to get a more symmetrical distribution of random numbers, as well as increase the speed of their generation. After processing, the data from the generator under study have better statistical characteristics, which is confirmed by the NIST and Diehard tests, and the generation rate has also increased by more than 5 times. The results of this work may be useful to developers of hardware random number generators who need to improve the performance of the generator.

Keywords: hardware random number generator, noise diode, statistical test suite, NIST, Diehard, high-order finite difference.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Pikuza M. O. Statistical Characteristics Improvement of a Hardware Random Number Generator by a Software Method. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 43–47.

Введение

Случайные последовательности имеют большое значение во многих прикладных аспектах – в криптографии, математическом моделировании, игровой индустрии и др. Для формирования случайных последовательностей часто применяют аппаратные генераторы случайных чисел (ГСЧ). Получение случайных чисел в таких устройствах осуществляется на основе хаотически изменяющихся физических процессов, таких как тепловой и квантовый шум. Хаотически изменяющиеся процессы теоретически непредсказуемы, однако на практике на них могут влиять окружающая среда и измеряющая аппаратура, что в итоге приводит к ухудшению статистических характеристик ГСЧ. Одним из проявлений ухудшения характеристик ГСЧ является неравномерность распределения случайных величин, что выражается в разном соотношении 0 и 1 в выходной последовательности ГСЧ, что может быть критично в области защиты информации [1].

В [2] представлено тестирование аппаратного ГСЧ на основе шумового диода ND103L при помощи набора статистических тестов NIST. Установлено, что его статистические характеристики зависят от исходных параметров, таких как период снятия значений, обратный ток шумового диода и температура окружающей среды. В [2] в качестве одного из способов улучшения статистических характеристик ГСЧ предлагалось использовать программные алгоритмы постобработки выходной последовательности ГСЧ. Также в [2] реализован и применен метод улучшения характеристик ГСЧ, основанный на вычислении конечных разностей высокого порядка [3]. В результате применения метода были улучшены статистические характеристики ГСЧ и увеличена скорость генерации случайных чисел.

Реализация метода улучшения характеристик аппаратного генератора случайных чисел

Метод улучшения статистических характеристик аппаратного ГСЧ основан на вычислении конечных разностей высокого порядка. Применение данного метода приводит к увеличению как симметрии распределения случайных чисел, так и величины стандартного отклонения, а также скорости генерации случайных чисел [3].

Алгоритм программной реализации метода следующий. ПЭВМ от генератора принимает поток случайных двоичных чисел, объединенных по 8 бит, т. е. по байтам. Каждый полученный байт преобразуется в число размером 64 бит. Далее производится вычисление конечной разности N -го порядка над последовательностью 64-битных чисел. Вычисленное значение конечной разности преобразуется в положительное число и представляется в двоичном виде. От этого двоичного числа берется L младших бит и отправляется в выходной поток.

Реализованный метод применяли к опытному образцу аппаратного ГСЧ, построенного на основе шумового диода ND103L. Структурная схема ГСЧ показана на рис. 1, где $F_{\text{цш}}$ – частота цифрового шума. Данный генератор подключается к ПЭВМ и отправляет в виртуальный СОМ-порт поток случайных двоичных чисел, собранных в один байт. Подробное описание характеристик и принципа работы ГСЧ изложено в [2].

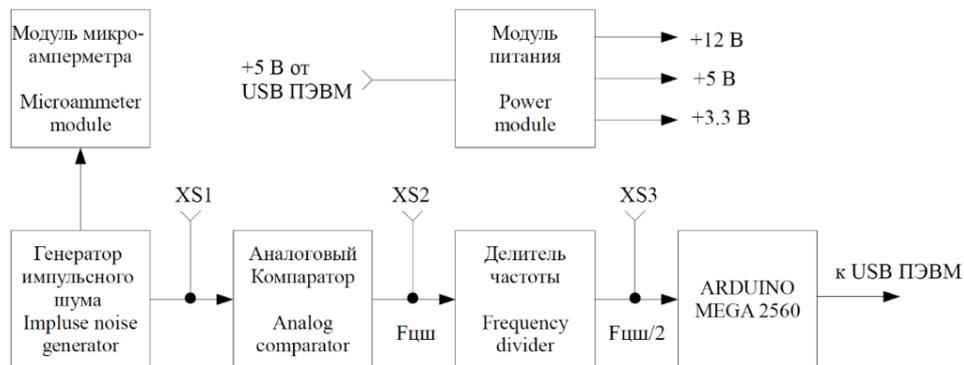


Рис. 1. Структурная схема опытного образца аппаратного генератора случайных чисел на шумовом диоде ND103L

Fig. 1. Structural circuit of a hardware random number generator prototype based on a noise diode ND103L

В ходе реализации метода было разработано специализированное программное обеспечение (ПО) для ПЭВМ, которое позволяло подключиться к виртуальному СОМ-порту и получить поток случайных чисел от ГСЧ в виде байт. Затем производили вычисления согласно описанному алгоритму и полученный поток случайных чисел отправляли в другой виртуальный СОМ-порт для дальнейшего использования в различных приложениях. Входной поток от ГСЧ и выходной поток после применения метода записывались в отдельные файлы для дальнейшего тестирования. Также в ПО можно задать порядок вычисляемой конечной разности N и количество младших бит L , отправляемых в выходной поток.

Тестирование метода улучшения характеристик аппаратного генератора случайных чисел

Для сравнения статистических характеристик последовательностей до и после применения метода использовали наборы статистических тестов от NIST и Diehard. Данные тесты позволяют исследовать различные типы отклонения от случайности, которые могут существовать в последовательности.

Набор тестов NIST содержал 15 статистических тестов:

- 1) частотный побитовый;
- 2) частотный блочный;
- 3) кумулятивных сумм;
- 4) на последовательность одинаковых битов;
- 5) на самую длинную последовательность единиц в блоке;
- 6) рангов бинарных матриц;
- 7) спектральный;

- 8) на совпадение неперекрывающихся шаблонов;
- 9) на совпадение перекрывающихся шаблонов;
- 10) универсальный статистический Маурера;
- 11) приближительной энтропии;
- 12) на произвольные отклонения;
- 13) другой на произвольные отклонения;
- 14) на периодичность;
- 15) на линейную сложность [4].

Набор тестов Diehard содержал 18 статистических тестов:

- 1) дней рождения;
- 2) пересекающихся подстановок;
- 3) рангов бинарных матриц 31×31;
- 4) рангов бинарных матриц 32×32;
- 5) рангов бинарных матриц 6×8;
- 6) потока бит;
- 7) перекрывающихся пар с редким размещением;
- 8) перекрывающихся четверок с редким размещением;
- 9) ДНК;
- 10) подсчета единиц по байтам;
- 11) подсчета единиц в потоке;
- 12) на парковку;
- 13) на минимальное расстояние;
- 14) случайных сфер;
- 15) сжатия;
- 16) пересекающихся сумм;
- 17) последовательностей;
- 18) игры в кости [5].

Для проверки метода на опытном образце ГСЧ были установлены следующие исходные параметры: период снятия значений $T_c = 15$ мкс; обратный ток шумового диода $I_{обр} = 20$ мкА; температура окружающей среды $t_{окр} = 24$ °С. Данные параметры позволили получить наилучшие статистические характеристики ГСЧ [2]. В разработанном ПО задавались порядок конечной разности $N = 47$ и количество младших бит $L = 45$. Данные параметры позволяют получить максимальную скорость генерации случайных чисел, избегая появления корреляции в последовательности [3]. В ходе тестирования от ГСЧ было получено и записано в файл 55790000 бит случайных данных. После применения метода получено и записано в файл 312466632 бит случайных данных. Оба файла были протестированы с помощью наборов статистических тестов от NIST и Diehard. Результаты тестирования приведены в табл. 1, 2.

Таблица 1. Результаты тестирования аппаратного генератора случайных чисел тестами NIST
Table 1. Hardware random number generator NIST test results

Результат / Result	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	Σ
Исходная последовательность		+			+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	11
Полученная последовательность	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	14

Таблица 2. Результаты тестирования аппаратного генератора случайных чисел тестами Diehard
Table 2. Hardware random number generator Diehard test results

Результат / Result	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	Σ
Исходная последовательность	+		?	+	+	+		+	+	+	+	+	+			+	+		13
Полученная последовательность	+	+	?	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+			+	+		15

В табл. 1, 2 указаны результаты тестирования исходной и полученной последовательностей тестами NIST и Diehard. Успешно пройденные тесты отмечены символом «+» в соответствующих столбцах. В последнем столбце указана сумма всех успешно пройденных тестов для конкретной последовательности. Для тестов Diehard третий тест не проводился (отмечен символом «?»).

Заключение

Из результатов тестирования можно сделать следующие выводы:

– после выполнения алгоритма улучшились статистические характеристики потока случайных чисел, что подтверждается увеличением количества успешно пройденных тестов NIST и Diehard. Совершенствование характеристик связано с симметрированием распределения случайных значений и увеличением показателя стандартного отклонения после нахождения конечной разности высокого порядка;

– с помощью предлагаемого метода удалось увеличить скорость генерации случайных чисел в 5,6 раза, обеспечивая статистические характеристики не хуже исходных. Увеличение скорости происходит за счет того, что на каждые 8 бит данных от генератора случайных чисел с использованием рассматриваемого метода извлекается 45 бит.

Полученные результаты подтверждают, что предлагаемый метод можно применять в различных аппаратных генераторах случайных чисел с целью увеличения скорости генерации случайных чисел и улучшения статистических характеристик потока данных.

Список литературы / References

1. Herrero-Collantes, M. Quantum Random Number Generators / M. Herrero-Collantes, J. C. Garcia-Escartin // *Reviews of Modern Physics*. 2017. Vol. 89, No 1.
2. Пикуза, М. О. Тестирование аппаратного генератора случайных чисел при помощи набора статистических тестов NIST / М. О. Пикуза, С. Ю. Михневич // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 4. С. 37–42. / Pikuza M. O., Mikhnevich S. Yu. (2021) Testing a Hardware Random Number Generator Using NIST Statistical Test Suite. *Doklady BGUIR*. 19 (4), 37–42 (in Russian).
3. Chizhevsky, V. N. Symmetrization of Single-Sided or Non-Symmetrical Distributions: the Way to Enhance a Generation Rate of Random Bits from a Physical Source of Randomness / V. N. Chizhevsky // *Phys. Rev. E*. 2010. Vol. 82, No 5.
4. A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications / A. Rukhin [et al.]. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology, 2010.
5. Brown, R. G. Dieharder: a Random Number Test Suite. Version 3.31.1 / R. G. Brown, D. Eddelbuettel, D. Bauer. <http://webhome.phy.duke.edu/~rgb/General/dieharder.php>.

Сведения об авторе

Пикуза М. О., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Pikuza M. O., Postgraduate at the Department of Information Radiotechnologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 33 650-31-78
E-mail: maksimpikuza@gmail.com
Пикуза Максим Олегович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 33 650-31-78
E-mail: maksimpikuza@gmail.com
Pikuza Maksim Olegovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-48-55>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 537.531:621.039.537

ОБОСНОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ЭКРАНОВ НА ОСНОВЕ ПОРОШКООБРАЗНЫХ АЛЮМООКСИДОВ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ ЭНЕРГИИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИБОРОВ ЭЛЕКТРОННОЙ ТЕХНИКИ

Д. И. ПЕНЬЯЛОСА ОВАЛЬЕС, О. В. БОЙПРАВ, М. В. ТУМИЛОВИЧ, А. В. ГУСИНСКИЙ,
П. И. БАЛТРУКОВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 20.10.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментального обоснования возможности использования электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов для снижения энергии электромагнитного излучения приборов электронной техники. Для реализации указанной цели разработана методика оценки влияния материалов на уровень электромагнитного излучения приборов электронной техники, а также систематизирована методика оценки радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники. В соответствии с обозначенными методиками проведено исследование, по результатам которого определено, что электромагнитные экраны, содержащие композиционное покрытие на основе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа, обеспечивают подавление энергии электромагнитного излучения приборов электронной техники, а также уменьшение до двух раз радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средств вычислительной техники. Разработаны рекомендации по практическому применению композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа. В соответствии с этими рекомендациями такие покрытия могут быть использованы в процессе изготовления или усовершенствования технических и эксплуатационных свойств электромагнитных экранов, предназначенных для обеспечения электромагнитной совместимости приборов электронной техники, а также для решения задач, связанных с обеспечением информационной безопасности.

Ключевые слова: композиционное покрытие, оксид железа, порошкообразный алюмооксид, прибор электронной техники, электромагнитное излучение, экранирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пеньялоса Овальес Д. И., Бойправ О. В., Тумилович М. В., Гусинский А. В., Балтрукович П. И. Обоснование возможности использования электромагнитных экранов на основе порошкообразных алюмооксидов для снижения энергии электромагнитного излучения приборов электронной техники. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 48–55.

SUBSTANTIATION OF THE POSSIBILITY TO USE THE ELECTROMAGNETIC SHIELDS BASED ON POWDERED ALUMINUM OXIDES TO REDUCE THE ELECTROMAGNETIC RADIATION ENERGY OF ELECTRONIC DEVICES

DEIVIS ISAIAS PENIALOSA OVALIES, OLGA V. BOIPRAV,
MIRASLAU V. TUMILOVICH, ALEKSANDER V. GUSINSKY,
PIOTR I. BALTRUKOVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20.10.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The article introduces the results of the experimental substantiation of the possibility to use the electromagnetic shields based on powdered aluminum oxides to reduce the electromagnetic radiation energy introduced by electronic devices. To achieve this goal, a methodology has been developed for assessing the effect of materials on the electromagnetic radiation level of electronic devices, and a methodology for estimating the radius of the controlled zone of the secondary electromagnetic radiation of computer equipment has been systematized. In accordance with the indicated methods, the study has been carried out, based on the results of which it was determined that electromagnetic shields containing the composite coating based on powdered aluminum oxides and iron oxide provide suppression of the electromagnetic radiation energy of electronic devices, as well as a reduction of up to 2 times the radius of the controlled zone of the secondary electromagnetic radiation of computer equipment. Recommendations for the practical application of the composite coatings based on the powdered alumina and iron oxide have been developed. In accordance with these recommendations, such coatings can be used in the process of manufacturing or improving the technical and functional properties of electromagnetic shields designed to ensure the electromagnetic compatibility of electronic devices, as well as to solve problems related to the information security.

Keywords: composite coating, iron oxide, powdered aluminum oxide, electronic device, electromagnetic radiation, shielding.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Penialosa Ovalies D. I., Boiprav O. V., Tumilovich M. V., Gusinsky A. V., Baltrukovich P. I. Substantiation of the Possibility to Use the Electromagnetic Shields Based on Powdered Aluminum Oxides to Reduce the Electromagnetic Radiation Energy of Electronic Devices. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 48–55.

Введение

В [1] представлено экспериментальное обоснование способа улучшения экранирующих свойств композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов (электрокорунд, глинозем). Способ основан на модификации состава таких покрытий путем добавления в него порошкообразного оксида железа. В результате исследований разработана методика получения композиционных покрытий на базе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа, изготовлены экспериментальные образцы, определены значения коэффициентов отражения и передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц изготовленных образцов. Проведен сравнительный анализ полученных значений с аналогичными значениями, характерными для композиционных покрытий, наполнителями которых являются порошкообразные алюмооксиды (электрокорунд, глинозем), а также композиционных покрытий, где наполнитель – порошкообразный оксид железа.

Путем добавления порошкообразного оксида железа в состав композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов (электрокорунд, глинозем) можно уменьшить на 1,0–8,0 дБ значения их коэффициента передачи электромагнитного излучения в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц. Кроме того, в результате реализации предложенного способа можно обеспечить:

1) снижение на 2,0–20,0 дБ значений коэффициента отражения электромагнитного излучения в указанном диапазоне частот рассматриваемых композиционных покрытий при условии, если такие покрытия нанесены на металлические подложки;

2) радиопоглощающие свойства для рассматриваемых композиционных покрытий в диапазоне частот 2,5–5,0 ГГц.

Исследование, результаты которого представлены в рамках статьи, является развитием исследования, представленного в [1]. Его цель заключалась в экспериментальном обосновании возможности использования электромагнитных экранов, содержащих композиционное покрытие на основе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа, для снижения энергии электромагнитного излучения (ЭМИ) средств вычислительной техники. При достижении поставленной цели решали следующие задачи:

- разрабатывали методику оценки влияния материалов на уровень электромагнитного излучения приборов электронной техники (ПЭТ);
- систематизировали методику оценки радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения (ПЭМИ) средств вычислительной техники;
- разрабатывали партию образцов электромагнитных экранов, содержащих композиционное покрытие на основе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа;
- исследовали влияние разработанных образцов на эффективность снижения энергии ЭМИ ПЭТ, а также на эффективность уменьшения радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ средств вычислительной техники;
- составляли рекомендации по практическому применению композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа.

Методика проведения эксперимента

Разработанная методика оценки влияния материалов на уровень ЭМИ ПЭТ включает в себя следующие этапы.

1. Запуск ПЭТ, который является источником ЭМИ. В качестве такого прибора использовалось устройство — источник зондирующего радиосигнала. Особенность этого прибора состоит в том, что в него входят светодиоды, предназначенные для индикации генерирования и распространения зондирующего радиосигнала.

2. Фиксирование факта генерирования ЭМИ ПЭТ путем визуального контроля состояния светодиода, входящего в состав прибора электронной техники.

3. Расположение ПЭТ внутри корпуса экспериментального образца конструкции электромагнитного экрана, изготовленного из радиопрозрачного материала и экранированного разработанным покрытием.

4. Фиксирование факта нераспространения ЭМИ, исходящего от ПЭТ за пределы области пространства, экранированной с помощью экспериментальных образцов конструкций электромагнитных экранов путем визуального контроля состояния светодиода, входящего в состав ПЭТ.

Внешний вид ПЭТ, являющегося источником ЭМИ и использованного в рамках реализации представленной методики, приведен на рис. 1. Представленный ПЭТ является по своей сути источником зондирующего радиосигнала. В схеме этого ПЭТ содержатся светодиоды, которые используются для индикации генерирования и распространения зондирующего радиосигнала (на рисунке область расположения светодиодов на плате ПЭТ выделена с помощью окружности).



Рис. 1. Внешний вид использованного прибора электронной техники
Fig. 1. Appearance of used electronic device

Систематизированная методика оценки радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ средств вычислительной техники включает в себя следующие этапы (рис. 2).

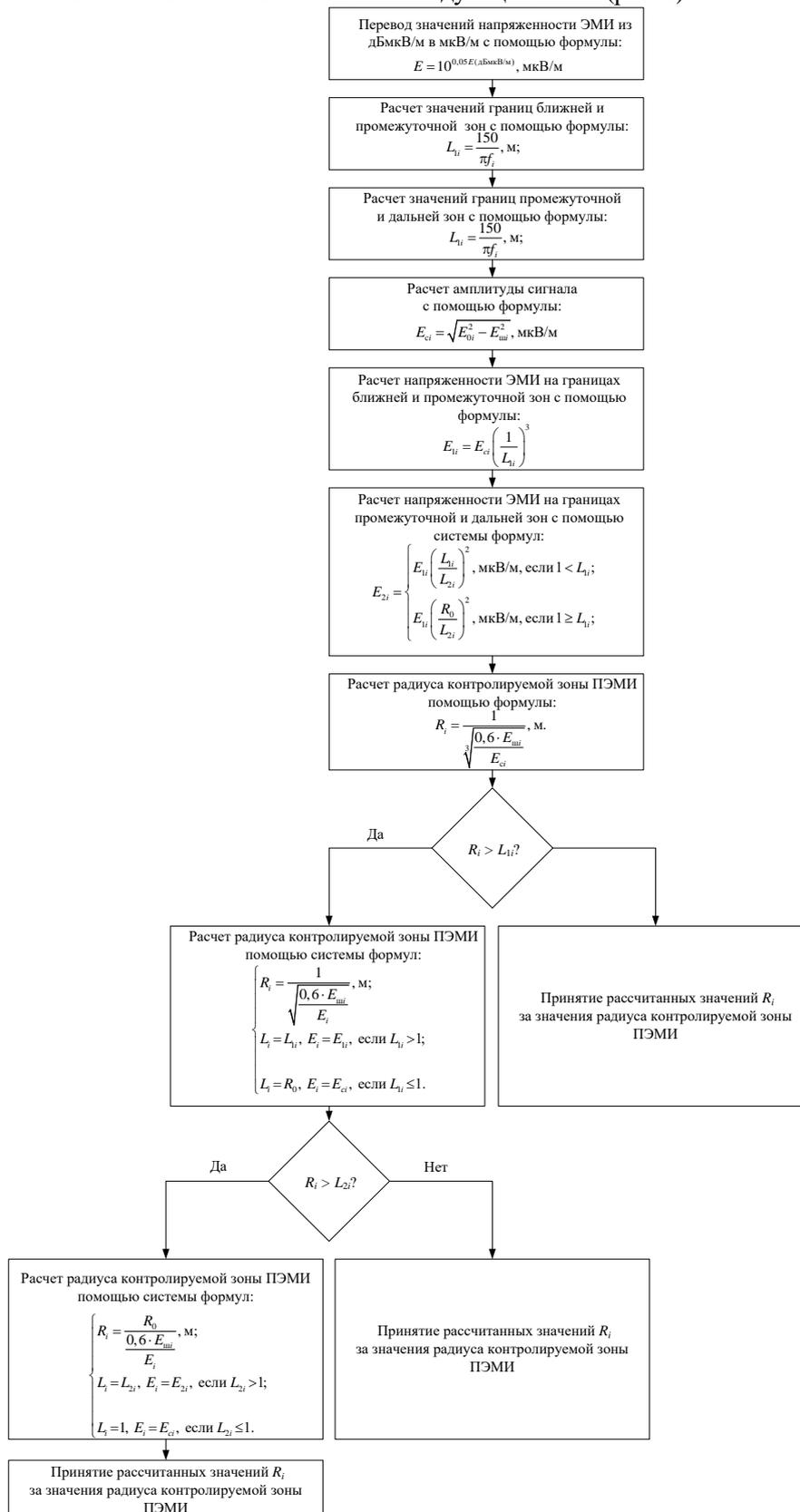


Рис. 2. Алгоритм расчета значений радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средства вычислительной техники
Fig. 2. Algorithm for calculating the values of the radius of the controlled area of side electromagnetic radiation of computer equipment

1. Измерение с помощью анализатора спектра уровней напряженности электромагнитного шума в диапазоне частот побочного ЭМИ ($E_{ши}$) в помещении, в котором размещен ПЭТ.

2. Измерение с помощью анализатора спектра уровней напряженности побочного ЭМИ средства вычислительной техники (E_{oi}).

3. Расположение между анализатором спектра и средством вычислительной техники экспериментального образца электромагнитного экрана.

4. Повтор этапа 2.

5. Расчет в соответствии с алгоритмом, представленным на рис. 2, значений радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ незэранированного и экранированного с помощью экспериментального образца электромагнитного экрана средства вычислительной техники.

6. Вычисление частного от деления значений радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ незэранированного средства вычислительной техники на значения радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ средства вычислительной техники, экранированного с помощью экспериментального образца электромагнитного экрана.

Партия экспериментальных образцов электромагнитных экранов изготавливалась в соответствии с методикой, включающей в себя следующие этапы [2, 3]:

– смешивание трех частей порошкообразного алюминия (электрокорунд, глинозем) с двумя частями порошкообразного оксида железа (по результатам исследований, представленных в [1], установлено, что смешивание обозначенных компонентов в указанных объемных долях является оптимальным);

– добавление пяти частей связующего вещества (водоэмульсионная краска, водный щелочной раствор силиката натрия или гипсовый раствор) в смесь порошкообразных алюминия и оксида железа;

– равномерное распределение частиц смеси порошкообразных алюминия и оксида железа по объему добавленного к ней связующего вещества с помощью лабораторного миксера;

– нанесение с помощью шпателя слоя полученной смеси на поверхность подложки;

– высушивание слоя смеси, нанесенной на поверхность подложки, при стандартных условиях;

– контроль толщины слоя смеси с помощью электронного микрометра;

– при необходимости наращивание толщины слоя смеси путем повторной реализации соответствующих этапов.

Результаты исследований и их обсуждение

Внешний вид ПЭТ, расположенного в области пространства, экранированной с помощью изготовленного экспериментального образца электромагнитного экрана, представлен на рис. 3.

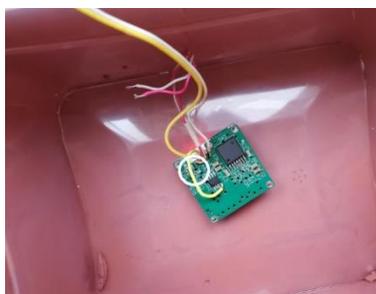


Рис. 3. Внешний вид прибора электронной техники, расположенного в области пространства, экранированной с помощью изготовленного экспериментального образца электромагнитного экрана

Fig. 3. Appearance of electronic device located in a space area shielded with developed electromagnetic shields sample

На рис. 3 область расположения используемых для индикации генерирования и распространения зондирующего радиосигнала светодиодов на плате ПЭТ выделена с помощью окружности. Из рисунка видно, что названные светодиоды не горят. Это свидетельствует о том,

что указанный прибор, будучи расположенный в области пространства, экранированной с помощью изготовленного экспериментального образца электромагнитного экрана, не генерирует и не распространяет зондирующий радиосигнал. Таким образом, электромагнитные экраны, содержащие композиционное покрытие на основе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа, обеспечивают подавление энергии ЭМИ ПЭТ.

Результаты оценки радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ средства вычислительной техники приведены на рис. 4.

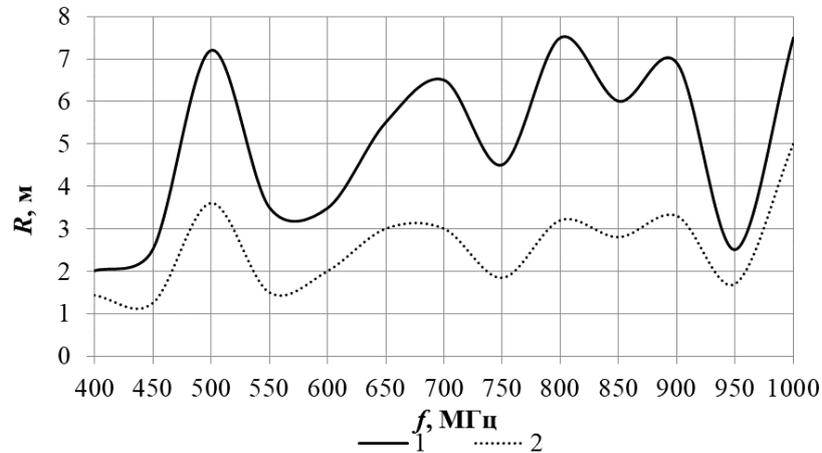


Рис. 4. Частотные зависимости: 1 – радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средства вычислительной техники; 2 – радиуса контролируемой зоны побочного электромагнитного излучения средства вычислительной техники, экранированного с помощью изготовленного экспериментального образца электромагнитного экрана

Fig. 4. Frequency dependences of: 1 – the radius of the controlled zone of the side electromagnetic radiation of computer equipment; 2 – the radius of the controlled zone of the side electromagnetic radiation of the computer equipment, shielded with manufactured experimental sample of the electromagnetic shield

Из рис. 4 видно, что электромагнитные экраны, содержащие покрытие на основе порошкообразных оксидов и оксидов железа, обеспечивают уменьшение до двух раз радиуса контролируемой зоны побочного ЭМИ ПЭТ. Ослабление энергии ЭМИ указанными экранами обусловлено явлениями рассеяния электромагнитного излучения на частицах, входящих в состав порошкообразных материалов, а также диэлектрическими и магнитными потерями [4–7].

Заключение

Из полученных результатов испытаний следует, что электромагнитные экраны, содержащие покрытие на основе порошкообразных оксидов и оксидов железа, могут быть использованы как для обеспечения электромагнитной совместимости приборов электронной техники, так и для предотвращения утечки информации, обрабатываемой с помощью средств вычислительной техники. При этом названные экраны наиболее целесообразно применять в составе систем архитектурного (в виде облицовочных панелей для стен) и зонального (в виде перегородок) электромагнитного экранирования помещений, в которых располагаются указанные приборы [8–10]. Кроме того, композиционные покрытия на основе порошкообразных оксидов и оксидов железа могут быть использованы в процессе изготовления или усовершенствования технических и эксплуатационных свойств электромагнитных экранов, предназначенных для обеспечения электромагнитной совместимости радиоэлектронного оборудования.

Список литературы

1. Electromagnetic Radiation Shielding Composite Coatings Based on Powdered Alumina and Iron Oxides / D. I. Penialosa Ovalies [et al.] // Doklady BGUIR. 2021. Vol. 19, No 3. P. 104–109. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-3-104-109.
2. Способ модификации состава негорючих композиционных покрытий на основе порошковых алюмооксидов для электромагнитных экранов / О. В. Бойправ [и др.] // Приборы. 2021. № 1. С. 47–54.
3. Структура и магнитные свойства нанопорошков оксидов железа и гибридных нанопорошков типа «ядро – оболочка» на их основе / И. С. Гребенников [и др.] // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2018. Т. 9, № 82. С. 1343–1354.
4. Шапиро, Д. Н. Электромагнитное экранирование / Д. Н. Шапиро. Долгопрудный: Интеллект, 2010.
5. Хиппель, А. Р. Диэлектрики и волны / А. Р. Хиппель. М.: ИЛ, 1960.
6. Шольц, Н. Н. Ферриты для радиочастот / Н. Н. Шольц, К. А. Пискарев. М.: Энергия, 1966.
7. Михайлин, Ю. А. Специальные полимерные композиционные материалы / Ю. А. Михайлин. СПб.: Научные основы и технологии, 2008.
8. Аполлонский, С. М. Электромагнитные поля в технических устройствах / С. М. Аполлонский. Саарбрюккен: Palmarium Academic Publishing, 2014.
9. Ефанов, Е. И. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем / Е. И. Ефанов, А. А. Тихомиров. Томск: Томский госуд. ун-т систем управл. и радиоэлектр., 2012.
10. Барсуков, С. В. Интегрированная защита специальных экранированных помещений / С. С. Барсуков // Специальная техника. 1999. № 6. С. 21–25.

References

1. Penialosa Ovalies D. I., Boiprav O. V., Tumilovich M. V., Lynkou L. M. (2021) Electromagnetic Radiation Shielding Composite Coatings Based on Powdered Alumina and Iron Oxides. *Doklady BGUIR*. 19 (3), 104–109. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-3-104-109.
2. Boiprav O. V., Penalosa Ovalles D. I., Tumilovich M. V., Lynkov L. M. (2021) A Method for Modifying the Composition of Non-Combustible Composite Coatings Based on Powdered Aluminum Oxides for Electromagnetic Screens. *Pribory = Devices*. (1), 47–54 (in Russian).
3. Grebennikov I. S., Savchenko A. G., Zaitseva M. P., Muradova A. G., Yurtov E. V. (2018) Structure and Magnetic Properties of Iron Oxide Nanopowders and Hybrid Core – Shell Nanopowders Based on Them. *Izvestija Rossijskoj Akademii Nauk. Serija Fizicheskaja*. 9 (82), 1343–1354 (in Russian).
4. Shapiro D. N. (2010) *Electromagnetic Shielding*. Dolgoprudny, Intellect Publ. (in Russian).
5. Hippel A. R. (1960) *Dielectrics and Waves*. Moscow, IL Publ. (in Russian).
6. Scholz N. N., Piskarev K. A. (1966) *Ferrites for Radio Frequencies*. Moscow, Energy Publ. (in Russian).
7. Mikhailin Yu. A. (2008) *Special Polymer Composite Materials*. St. Petersburg, Scientific Bases and Technologies (in Russian).
8. Apollonsky S. M. (2014) *Electromagnetic Fields in Technical Devices*. Saarbrücken, Palmarium Academic Pub. (in Russian).
9. Efanov E. I., Tikhomirov A. A. (2012) *Electromagnetic Compatibility of Radio Electronic Means and Systems*. Tomsk, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (in Russian).
10. Barsukov S. V. (1999) Integrated Protection for Special Shielded Rooms. *Special'naja Tehnika*. (6), 21–25 (in Russian).

Вклад авторов

Пеньялоса Овальес Д. И. разработал метод получения композиционных покрытий на основе порошкообразных алюмооксидов и оксида железа.

Бойправ О. В. оказала помощь в систематизации методики оценки радиуса контролируемой зоны вторичного электромагнитного излучения вычислительной техники, в проведении измерений, а также в интерпретации результатов измерений и написании статьи.

Тумилович М. В. определил актуальность, цели и задачи исследования, результаты которого представлены в статье.

Гусинский А. В. оказал помощь в разработке методики оценки влияния материалов на уровень электромагнитного излучения электронных устройств, а также в проведении измерений по предложенному методу.

Балтрукович П. И. участвовал в обсуждении результатов экспериментов.

Authors' contribution

Penialosa Ovalies D. I. has developed the method for manufacturing of composite coatings based on powdered alumina and iron oxides.

Boiprav O.V. has assisted in systematization of the method for evaluation the radius of the controlled zone of secondary electromagnetic radiation of computer equipment, in carrying out the measurements, interpreting the measurement results, as well as in writing the article.

Tumilovich M. V. has determined the relevance, aims and objectives of the research, the results of which are presented in the article.

Gusinsky A. V. has assisted in developing of the method for assessing the influence of materials on the level of electromagnetic radiation of electronic devices, as well as in carrying out the measurements according to the method.

Baltrukovich P. I. participated in the discussion of the results of the experiments.

Сведения об авторах

Пеньялоса Овальес Д. И., стажер кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бойправ О. В., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тумилович М. В., д.т.н., доцент, начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гусинский А. В., к.т.н., доцент, начальник Центра 1.9 научно-исследовательской части Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Балтрукович П. И., к.т.н., доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Penialosa Ovalies D. I., Intern of Information Protection Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Boiprav O. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Associate Professor at Information Protection Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tumilovich M. V., Dr. of Sci., Associate Professor, Head of the Department for Training Highly Qualified Personnel of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gusinsky A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Head of the Center 1.9 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Baltrukovich P. I., Cand. of Sci., Associate Professor at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
E-mail: deivis@bsuir.by
Тел. +375 17 293-22-09
Пеньялоса Овальес Дейвис Исаиас

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
E-mail: deivis@bsuir.by
Tel. +375 17 293-22-09
Penialosa Ovalies Deivis Isaias



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-56-64>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391.82

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗБИРАТЕЛЬНОСТИ ИЗЛУЧЕНИЯ БАЗОВЫХ СТАНЦИЙ МОБИЛЬНОЙ СВЯЗИ НА УРОВЕНЬ СОЗДАВАЕМОГО ИМИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ФОНА

В. И. МОРДАЧЕВ, Д. А. ЦИОНЕНКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 24.03.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Радиочастотное электромагнитное излучение базовых станций является основным источником электромагнитного фона, создаваемого системами мобильной (сотовой) связи на селитебной территории; его интенсивность вносит существенный вклад в уровень электромагнитного загрязнения среды обитания и определяет степень электромагнитной безопасности населения. Предложенная ранее методика оценки средней интенсивности этого фона, основанная на анализе территориальной интенсивности мобильного трафика, учитывает пространственную избирательность излучений базовых станций в упрощенной форме путем введения параметра направленности излучения U , обратного числу секторов обслуживания базовой станции, в предположении равенства ширины главного лепестка диаграммы направленности излучения ширине этого сектора и без учета направленности излучения в вертикальной плоскости, что определяет пессимистический характер этих оценок. Выполнен уточненный анализ значений параметра U для двухуровневой модели диаграмм направленности антенн, отражающей реальные значения ширины их главного лепестка в горизонтальной и вертикальной плоскостях, относительные уровни боковых лепестков и соотношение мощностей излучений по главному и боковым лепесткам. Анализ проведен как для стационарных секторных антенн систем сотовой связи, так и для адаптивных активных фазированных антенных решеток 4G/5G, способных обеспечивать обслуживание с использованием узких лучей. Установлено, что значение параметра U секторных антенн на 5–15 дБ меньше величины, обратной числу секторов базовой станции, а для узких лучей адаптивных антенных решеток это различие достигает 20 дБ. При углах наклона главных лепестков по отношению к горизонту менее 30° при оценке средней интенсивности электромагнитного фона в качестве параметра U пространственной избирательности (направленности) излучений базовых станций может быть использовано значение, обратное коэффициенту усиления антенны в главном лепестке.

Ключевые слова: мобильная связь, базовая станция, электромагнитное излучение, пространственная избирательность, антенна, диаграмма направленности, главный лепесток, боковые лепестки, азимут, угол визирования, электромагнитный фон.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Мордачев В. И., Ционенко Д. А. Влияние пространственной избирательности излучения базовых станций мобильной связи на уровень создаваемого ими электромагнитного фона. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 56–64.

INFLUENCE OF SPATIAL SELECTIVITY OF RADIATION OF MOBILE COMMUNICATION BASE STATIONS ON THE LEVEL OF ELECTROMAGNETIC BACKGROUND INTRODUCED BY THEM

VLADIMIR I. MORDACHEV, DZMITRY A. TSYANENKA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 24.03.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Radio frequency electromagnetic radiation from base stations is the main source of electromagnetic background generated by mobile (cellular) communication systems in residential areas; its intensity makes a significant contribution to the level of electromagnetic pollution of the habitat and determines the level of electromagnetic safety of the population. The previously proposed technique for estimating the average intensity of this background, based on the analysis of the territorial intensity of mobile traffic, takes into account the spatial selectivity of base station radiation in a simplified form by introducing the radiation directivity parameter U , equal to the inverse of the number of base station service sectors, assuming that the width of the main lobe of the radiation pattern is equal to the width of this sector and without taking into account the radiation directivity in the vertical plane, which determines the pessimistic nature of these estimates. The paper presents a refined analysis of the values of the parameter U for a two-level models of antenna radiation patterns, which reflects the real values of the width of their main lobes in horizontal and vertical planes, the relative levels of side lobes and the ratio of radiation power of the main and side lobes. The analysis was performed both for stationary sector antennas of cellular communication systems and for adaptive phased antenna arrays of 4G/5G systems capable of providing service using narrow beams. The analysis showed that the value of the U parameter of sector antennas is 5–15 dB less than the inverse of the number of sectors of base stations, and for narrow beams of adaptive antenna arrays, this difference reaches 20 dB. If tilt angles of main lobes of antenna radiation patterns with respect to the horizon are less than 30° , then at estimation of the average electromagnetic background intensity the inverse of their antenna gain in the main lobe can be used as the U parameter value of the spatial selectivity (directivity) of base stations radiations.

Keywords: mobile communications, base station, electromagnetic radiation, spatial selectivity, antenna, pattern, main lobe, side lobes, azimuth, viewing angle, electromagnetic background.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Mordachev V. I., Tsyankenka D. A. Influence of Spatial Selectivity of Radiation of Mobile Communication Base Stations on the Level of Electromagnetic Background Introduced by them. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 56–64.

Введение

Электромагнитное загрязнение среды обитания, вызванное интенсивным применением систем беспроводного информационного обслуживания общества, их проникновением во все сферы человеческой деятельности, становится острой техногенной проблемой современности. Стремительная эволюция поколений мобильной (сотовой) связи (МС) 4G→5G→6G определяет одно из главных направлений прогресса человечества. МС 4G/5G/6G глубоко интегрируется со всеми сферами человеческого бытия, но при этом использует потенциально опасные для здоровья населения технологии. При определенных условиях это может стать причиной ухудшения электромагнитной экологии среды обитания и недопустимого роста вынужденных и добровольных рисков для здоровья населения.

В [1–3] предложена и верифицирована с использованием опубликованных результатов экспериментальных исследований электромагнитной обстановки (ЭМО) в десятках стран пяти континентов методика оценки средней суммарной интенсивности радиочастотного электромагнитного фона (ЭМФ РЧ), создаваемого электромагнитными излучениями (ЭМИ)

базовых станций (БС) МС на основе анализа системных характеристик радиосетей мобильной связи: средней территориальной плотности беспроводного трафика (Area Traffic Capacity, ATC); средней электромагнитной нагрузки на территорию (ЭМНТ) (Electromagnetic Loading on Area), создаваемой ЭМИ БС в различных полосах частот МС; спектральной эффективности передачи данных по прямым (нисходящим) радиоканалам и т. п. Данная методика позволяет учесть влияние пространственной избирательности ЭМИ БС на интенсивность создаваемого ЭМФ РЧ, однако результаты анализа этого влияния до настоящего времени отсутствуют. Такой анализ приобретает особую актуальность в связи с применением в БС МС 4G/5G активных фазированных антенных решеток (АФАР) – АФАР 2D ММО, обеспечивающих формирование в секторе обслуживания шириной 90° – 120° «веерной» многолучевой диаграммы направленности (ДН) с шириной каждого луча 12° – 36° , и АФАР Massive ММО, при использовании технологии Beamforming, обеспечивающей формирование индивидуальных относительно узких лучей для каждой из обслуживаемых абонентских станций (АС) [4].

Цель исследований авторов – уточнение влияния направленности ЭМИ БС в горизонтальной и вертикальной плоскостях на интенсивность ЭМФ РЧ, создаваемого радиосетями МС.

Методика анализа

Основные соотношения для оценки интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого БС

Пессимистическая оценка (оценка наихудшего случая) средней суммарной интенсивности ЭМФ $Z_{BS\Sigma}$ [Вт/м²], создаваемого в некоторой случайно выбранной точке наблюдения (ТН) у земной поверхности на высоте $H_{OP} \approx 1$ – 2 м (примерно соответствующей высоте человеческого роста) множеством БС МС, расположенных в области радиовидимости из ТН, с высотами подвеса антенн $H_{BS} \gg H_{OP}$, определяется следующим соотношением [1–3]:

$$Z_{BSk} \approx \frac{B}{2} \ln \left(\frac{4H_{OP}\sqrt{e}}{\lambda} \right), \quad H_{OP} \geq \frac{\lambda}{4}; \quad Z_{BS\Sigma} = \sum_{k=1}^K |Z_{BSk}|, \quad (1)$$

где B – средняя ЭМНТ, создаваемая излучениями БС на рассматриваемой территории, Вт/м²; λ – длина волны используемой полосы частот; $Z_{BS\Sigma}$ – определяется как скалярная сумма значений Z_{BSk} , $k \in [1, K]$ плотности потока мощности ЭМИ K БС, наблюдаемых в ТН.

Средняя ЭМНТ, создаваемая множеством K источников ЭМИ, распределенных равномерно по территории площадью S , м², определяется как сумма значений охватывающей эту территорию полной излучаемой мощности (covering total radiated power, CTRP [3]) P_{ek} каждого источника, приходящаяся на единицу территории:

$$B = \frac{\sum_{k=1}^K P_{ek}}{S}; \quad P_{Sk} \approx \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi P_k(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi; \quad P_k(\theta, \varphi) = P_{Txk} g_k(\theta, \varphi), \quad (2)$$

где P_{Sk} – часть полной излучаемой мощности P_{Txk} (total radiated power, TRP [5]) k -го источника, излученной его антенной в телесном угле $\Omega \leq 2\pi$, охватывающем подстилающую поверхность S , за вычетом потерь в антенно-фидерном тракте; $P_k(\theta, \varphi)$ – мощность ЭМИ антенны k -го источника в направлении $\{\theta, \varphi\}$; $g_k(\theta, \varphi)$ – нормированная ДН антенны k -го источника, характеризующая пространственную избирательность его ЭМИ.

Приблизительное равенство в (2) отражает тот факт, что диапазон углов визирования сферической земной поверхности из расположенного над ней фазового центра антенны БС несколько меньше π . В (2) при вычислении P_{ek} интегрирование производится только по нижней полусфере (рис. 1) в телесном угле с вершиной O в фазовом центре антенны БС, стягиваемом земной поверхностью, так как ЭМИ верхней полусферы не участвуют в формировании ЭМО и в образовании ЭМФ РЧ у земной поверхности. В этом состоит отличие параметра P_{ek} CTRP от TRP в [5]. Поскольку мощности, излучаемые современными антеннами по главному лепестку ДН и вне его, имеют близкие значения [6], величины параметра CTRP оказываются на 1–3 дБ меньше значений TRP.

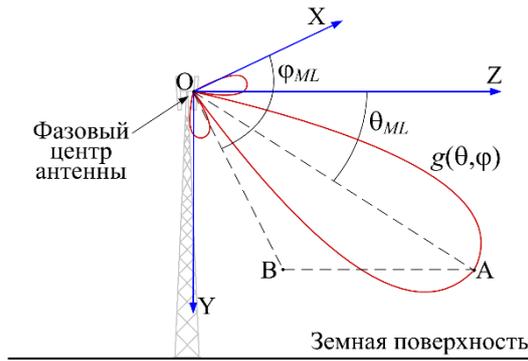


Рис. 1. Диаграмма направленности антенны источника электромагнитных излучений в сферических координатах $\{\theta, \varphi\}$: φ_{ML} , θ_{ML} – параметры направления оси главного лепестка (ГЛ); OB – проекция оси ГЛ на плоскость XY

Fig. 1. The antenna pattern of the electromagnetic radiation source in spherical coordinates $\{\theta, \varphi\}$: φ_{ML} , θ_{ML} – the direction parameters of the main lobe (ML) axis; OB – projection of the ML axis onto the XY plane

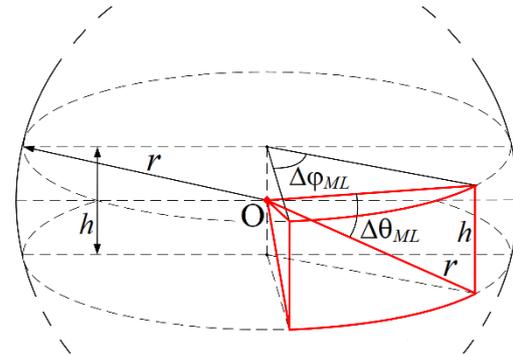


Рис. 2. Определение главного лепестка двухуровневой модели диаграммы направленности антенны как части сферы с вершиной в фазовом центре O , ограничиваемой углами $\Delta\varphi_{ML}$ и $\Delta\theta_{ML}$

Fig. 2. Determination of the main lobe of a two-level model of antenna pattern as a part of a sphere with apex at the phase center O , limited by angles $\Delta\varphi_{ML}$ and $\Delta\theta_{ML}$

При равномерном случайном распределении обслуживаемых АС по территории со средней плотностью ρ , АС/м², если каждая АС осуществляет радиоприем потока данных со скоростью v , бит/с, то средняя территориальная плотность трафика информационного обслуживания населения по прямым каналам БС будет определяться как $S_{tr} = \rho v$, бит/с/м², и создаваемая БС МС средняя ЭМНТ B , Вт/м², составит [2, 3]:

$$B(R_{\max}, S_{tr}, K_{CC}, W_{ER}, m, \lambda) = \frac{8\pi^2 k T_0 K_N D_{\Sigma} (2^{m W_{ER}} - 1) R_{\max}^2 S_{tr} U}{\lambda^2 W_{ER}}; D_{\Sigma} = (K_{CC} + 1) L_m L_c K_H, \quad (3)$$

где k – постоянная Больцмана, $1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/К; K_N – коэффициент шума радиоприемника, ед.; T_0 – температура окружающей среды, град. ($T_0 = 290$ К); W_{ER} – спектральная эффективность передачи информации в нисходящем радиоканале (РК) БС, в m раз отличающаяся от потенциальной, определяемой в соответствии с известной теоремой Шеннона-Хартли, бит/с/Гц; $K_{CC} = N_{INT} / N_0$ – коэффициент, характеризующий создаваемое в РК превышение уровнем внутрисетевой помехи N_{INT} уровня теплового шума N_0 ; S_{tr} – средняя АТС, создаваемая множеством БС на рассматриваемой территории, бит/с/м² (интегральная системная характеристика мобильной связи 4G/5G/6G [7, 8]); R_{\max} – радиус зоны обслуживания БС, на границе которой обслуживание АС с необходимым отношением «сигнал/(помеха+шум)» (SINR) требует максимальной эквивалентной изотропной излучаемой энергии БС на бит передаваемой информации; D_{Σ} – совокупный запас в мощности излучения БС, связанный с необходимостью преодоления внутрисистемных помех, компенсации потерь L_m на затухание радиоволн в зданиях, потерь на замирания L_c при распространении радиоволн в «каньонах» городской застройки вследствие многолучевости и дифракции, а также с необходимым запасом K_H в уровне принимаемого сигнала АС для реализации хендвера; $U = P_{AR} / P_{AI} < 1$ – системный параметр направленности ЭМИ БС, определяемый как отношение значений совокупной мощности P_{AR} ЭМИ БС, облучающей область S радиовидимости БС с земной поверхности, для случая реальной антенны БС с ДН $g(\theta, \varphi)$ и главным лепестком (ГЛ), направленным на обслуживаемую АС, и совокупной мощности P_{AI} идеальной всенаправленной (изотропной) антенны БС, облучающей эту область, при условии, что на входе радиоприемника АС, расположенной в точке, соответствующей направлению $\{\theta_{ML}, \varphi_{ML}\}$ оси ГЛ, в обоих случаях присутствует сигнал одинакового уровня, не ниже соответствующего необходимому значению SINR на границе зоны обслуживания БС: $P_{AR}(\theta_{ML}, \varphi_{ML}) = P_{AI}(\theta_{ML}, \varphi_{ML})$; U – параметр направленности, в интегральной форме характеризующий пространственную избирательность ЭМИ БС МС при передаче информации по прямым каналам.

Таким образом, если известна нормированная ДН $g(\theta, \varphi)$ антенны БС по азимуту φ и углу визирования θ по плотности потока мощности, то параметр ЭМИ БС определяется ее интегрированием по телесному углу, охватывающему поверхность S :

$$U = \frac{P_{AK}}{P_{AI}} = \frac{1}{2\pi} \int_0^\pi \int_0^\pi g_N(\theta, \varphi) \sin(\theta) d\theta d\varphi; \quad g_N(\theta, \varphi) = \frac{g(\theta, \varphi)}{g(\theta_{ML}, \varphi_{ML})} \leq 1. \quad (4)$$

Если структура радиосети МС регулярна с N_S секторами по азимуту на каждой БС, то грубая оценка наихудшего случая для средней интенсивности $Z_{BS\Sigma}$ ЭМФ, создаваемого множеством ЭМИ БС на рассматриваемой территории, может быть получена как $U_\varphi \approx 1/N_S$ [2, 3]. Однако эта оценка, не в полной мере учитывающая пространственную избирательность ЭМИ БС, в частности, в вертикальной плоскости, завышена и может быть уточнена путем определения параметра (4) для известных моделей ДН с достаточной степенью адекватности соответствующих реальным характеристикам направленности и ориентации антенн БС.

Модель направленности ЭМИ БС

Анализ влияния избирательности ЭМИ БС по азимуту φ и углу визирования θ на значение параметра U в (3) выполнен интегрированием (4) моделей ДН антенн БС по сферическим координатам (при горизонтальном расположении зенитной оси) в телесном угле $\Omega_S \approx 2\pi$, стягиваемом земной поверхностью, ограниченной линией горизонта. В этом телесном угле располагается ГЛ ДН антенны БС, всегда направленный к земной поверхности. ЭМИ БС в верхнюю полусферу не рассматривается, поскольку оно не участвует в создании ЭМНТ (3) на земную поверхность. Поэтому интегрирование в (4) должно осуществляться по интервалам $\{\varphi \in [-\pi/2, \pi/2], \theta \in [0, \pi]\}$ или $\{\varphi \in [-\pi, \pi], \theta \in [0, \pi/2]\}$.

Анализ выполнен для ДН антенны БС, представленной известной двухуровневой моделью, параметрами которой являются значения $\Delta\varphi_{ML}, \Delta\theta_{ML}$ ширины ГЛ ДН по азимуту и углу визирования, согласно рис. 2, для относительного уровня боковых лепестков G_{SL} , а также отношения $C_p = P_{ML} / P_{SL}$ мощностей ЭМИ БС по главному и боковым лепесткам ДН [6]. Эта модель включает следующие соотношения:

– для нормированной ДН антенны:

$$g_N(\varphi, \theta) = \begin{cases} 1, \varphi \in D\varphi_{ML} = \left[\varphi_{ML} - \frac{\Delta\varphi_{ML}}{2}, \varphi_{ML} + \frac{\Delta\varphi_{ML}}{2} \right], \theta \in D\theta_{ML} = \left[\theta_{ML} - \frac{\Delta\theta_{ML}}{2}, \theta_{ML} + \frac{\Delta\theta_{ML}}{2} \right]; \\ G_{SL} = \left[(\Delta\varphi_{ML}/2\pi C_p) \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right] / \left[1 - (\Delta\varphi_{ML}/2\pi) \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right], \varphi \notin D\varphi_{ML}, \theta \notin D\theta_{ML}; \end{cases} \quad (5)$$

– для коэффициента усиления G_{ML} в ГЛ ДН антенны:

$$G_{ML} = 2\pi C_p / \left[(C_p + 1) \Delta\varphi_{ML} \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right]; \quad (6)$$

– для отношения мощностей ЭМИ БС по главному и боковым лепесткам ДН:

$$C_p = \left[G_{ML} \Delta\varphi_{ML} \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right] / \left[2\pi - G_{ML} \Delta\varphi_{ML} \sin(\Delta\theta_{ML}/2) \right]. \quad (7)$$

Результаты анализа и их обсуждение

Анализ влияния пространственной избирательности ЭМИ антенн БС МС на уровень создаваемого ими ЭМФ РЧ у земной поверхности выполнен для типовой секторной топологии радиосети МС, для которой характерно следующее:

– при трехсекторной топологии сотовой радиосети 2G/3G/4G, как правило, используются антенны с шириной ГЛ ДН по половинной мощности по горизонтали $60^\circ-70^\circ$ и по вертикали $12^\circ-24^\circ$ в полосах частот нижней трети диапазона УВЧ (CDMA 450, GSM 800/900) и $5^\circ-12^\circ$ в его верхней половине (GSM 1800, UMTS, LTE) с углом наклона оси ГЛ $\theta_{ML} \geq 10^\circ$ в вертикальной плоскости $5^\circ-20^\circ$;

– при использовании АФАР в секторах радиосетей МС 4G/5G в наиболее освоенном диапазоне частот FR1 (0,410–7,125 ГГц) с многолучевой структурой ДН в секторе обслуживания (АФАР 2D MIMO) и с адаптивным динамическим формированием лучей для каждого пользователя (режим Beamforming АФАР Massive MIMO) ширина отдельных лучей составляет

12°–110° в горизонтальной и 6°–24° в вертикальной плоскостях с углом наклона оси ГЛ $\theta_{ML} \geq 10^\circ$ в вертикальной плоскости в зависимости от числа элементов АФАР, принимающих участие в их формировании (от 2–4 до 8–16 элементов по каждой из координат) [4, 9, 10].

По данным [6], для направленных антенн отношение C_P мощностей ЭМИ по главному и боковым лепесткам ДН может принимать значения в интервале (1, 10). Для антенн БС МС, имеющих ограниченную избирательность по азимуту, обеспечивающую обслуживание АС в азимутальном секторе в сочетании с возможностью электронного отклонения оси ГЛ ДН по обеим координатам, этот параметр, как правило, принимает значения в интервале (1, 3). Его оценки, полученные с использованием (5)–(7) для ряда известных антенн БС МС диапазона УВЧ, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Оценки отношения C_P мощностей электромагнитного излучения по главному и боковым лепесткам диаграммы направленности для ряда известных антенн базовых станций мобильной связи

Table 1. Estimates of the C_P ratio of power of electromagnetic radiation through the patterns main and side lobes for some well-known base stations antennas of cellular communications

Тип антенны / Antenna type	G_{ML} , дБ/dB	$\Delta\varphi_{ML}$, град / deg	$\Delta\theta_{ML}$, град / deg	Полоса частот, МГц / Frequency band, MHz	C_P
Kathrein 742151	14,0	70°	16,0°	824–880	2,12
	14,5	65°	15,0°	880–960	1,98
	16,5	60°	8,0°	1710–1880	1,08
Huawei A2645 1800v06	18,0	65°	5,9°	1710–2690	1,42
Commscope NBX-6513DS-VTM	14,7	68°	15,0°	1710–1880	2,67
	14,8	66°	14,1°	1850–1990	2,12
	15,2	64°	13,5°	1920–2180	2,25

Результаты количественного анализа влияния пространственной избирательности ЭМИ БС на величину параметра U , определяющего уровень средней ЭМНТ (3), создаваемого множеством ЭМИ БС у земной поверхности, представлены в графической форме на рис. 3–6.

На рис. 3 сплошные кривые соответствуют расчетным зависимостям $U(\theta_{ML})$, полученным с использованием (4) для $C_P = 1,5$ для ширины ГЛ ДН по азимуту $\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$ и различных значений его ширины $\Delta\theta_{ML}$ по углу визирования. Пунктирные горизонтальные линии соответствуют величинам, обратным значениям $1/G_{ML}$, полученным с использованием (6) для тех же $\Delta\varphi_{ML}$, $\Delta\theta_{ML}$. Парам зависимостей № 1, 2, 3 и 4 соответствуют значения ширины ГЛ ДН антенны в вертикальной плоскости 24°, 18°, 12° и 6°. Нижняя граница анализируемых углов визирования ограничена значением $\theta_{min} = 10^\circ$, что связано с обеспечением снижения уровней внутрисистемных помех в радиосетях МС. Аналогичные зависимости, полученные для $C_P = 5$, приведены на рис. 4.

В связи с использованием в сетях МС 4G/5G АФАР, обеспечивающих в секторе обслуживания формирование множества лучей меньшей ширины и в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях, интерес представляет оценка возможного снижения за счет этого средней ЭМНТ, создаваемой множеством БС на территории, обслуживаемой сетью МС. На рис. 5 приведены пары расчетных зависимостей, характеризующих пространственную избирательность ЭМИ АФАР. Они аналогичны кривым на рис. 3, 4 и соответствуют ширине ГЛ $\Delta\varphi_{ML} = 24^\circ$, $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ при $C_P = 1$ (зависимость № 1) и $C_P = 2$ (№ 2) и ширине ГЛ $\Delta\varphi_{ML} = \Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ при $C_P = 1$ (№ 3) и $C_P = 2$ (№ 4).

Несмотря на существенное различие в значениях $\Delta\varphi_{ML}$, $\Delta\theta_{ML}$ и C_P , соответствующих различным зависимостям на рис. 3–5, при наклоне ГЛ ДН антенны примерно на 30° вниз по отношению к горизонту значение параметра пространственной избирательности ЭМИ БС оказывается равным величине, обратной коэффициенту усиления в ГЛ ДН антенны: $U \approx 1/G_{ML}$. При меньших углах наклона оси ГЛ использование этого значения U в (3) обеспечивает некоторый пессимизм в оценке средней интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого множеством ЭМИ БС, в связи с чем при углах наклона ГЛ ДН антенны 10°–20° величина $1/G_{ML}$ превышает значение U , получаемое с использованием (4), на 1–3 дБ.

Обратная картина наблюдается при углах наклона оси ГЛ ДН антенны более 30°, однако такие углы наклона для секторных антенн используются редко, и их рассмотрение может представлять некоторый интерес только для АФАР Massive MIMO с адаптивным динамическим формированием лучей для каждого пользователя в режиме Beamforming.

При равномерном случайном распределении АС по земной поверхности плотность распределения вероятности угла визирования, определяющего положение АС, имеет существенно асимметричный вид [11], и относительная вероятность нахождения обслуживаемой АС в области углов визирования $\theta_{ML} > 30^\circ$ мала.

На рис. 6 для равномерного случайного распределения АС по земной поверхности приведены расчетные зависимости отношения вероятности V_{INT} попадания случайно выбранной АС во «внутренний» интервал углов визирования $(30^\circ + \Delta\theta_{ML})/2 \leq \theta_{ML} \leq 90^\circ$ и вероятности V_{OUT} ее попадания во «внешний» интервал углов визирования $\theta_{min} \leq \theta_{ML} \leq (30^\circ + \Delta\theta_{ML}/2)$ от ширины $\Delta\theta_{ML}$ ГЛ в вертикальной плоскости. Зависимости получены для различных значений нижней границы θ_{min} углов визирования границы зоны обслуживания БС: кривая 1 – для $\theta_{min} = 10^\circ$, 2 – для $\theta_{min} = 7,5^\circ$, 3 – для $\theta_{min} = 5^\circ$. Они позволяют заключить, что в связи с тем, что для антенн БС с реальными значениями $\Delta\theta_{ML}$ эти вероятности различаются на порядок и более, различиями в оценках значений параметров U и $1/G_{ML}$ можно пренебречь для всей области возможных углов визирования направлений на обслуживаемые АС.

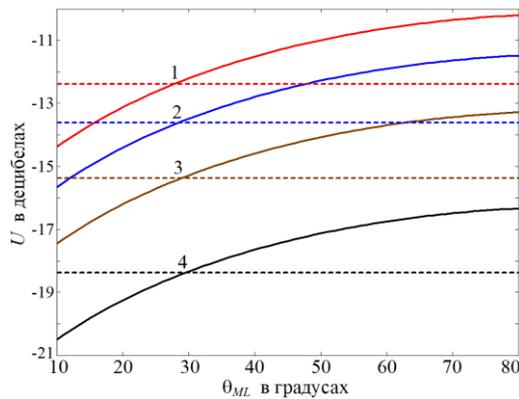


Рис. 3. Зависимость параметра избирательности электромагнитного излучения секторной антенной базовой станции ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) для $C_P = 1,5$ от наклона θ_{ML} главного лепестка ДН для различных $\Delta\theta_{ML}$

Fig. 3. Dependences of EMR BS selectivity parameter for $C_P = 1.5$ on the tilt angle θ_{ML} of the ML of sector antenna pattern ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) for different $\Delta\theta_{ML}$

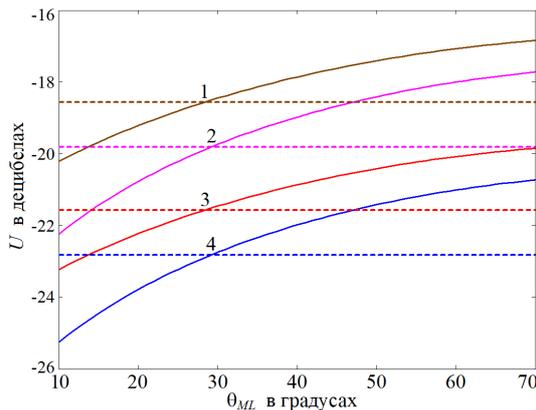


Рис. 5. Зависимость параметра избирательности электромагнитного излучения базовой станции с главным лепестком ДН активной фазированной антенной решетки $\Delta\varphi_{ML} = 24^\circ$, $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (кривые 1, 2) и $\Delta\varphi_{ML} = \Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (кривые 3, 4) от угла его наклона θ_{ML} для различных C_P

Fig. 5. Dependences of EMR selectivity parameter of BS active antenna array for ML width $\Delta\varphi_{ML} = 24^\circ$, $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (curves 1, 2) and $\Delta\varphi_{ML} = \Delta\theta_{ML} = 12^\circ$ (curves 3, 4) on the tilt angle θ_{ML} for different C_P

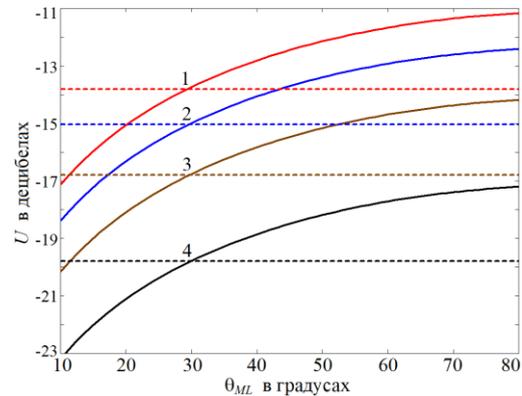


Рис. 4. Зависимость параметра избирательности электромагнитного излучения секторной антенной базовой станции ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) для $C_P = 5$ от наклона θ_{ML} главного лепестка ДН для различных $\Delta\theta_{ML}$

Fig. 4. Dependences of EMR BS selectivity parameter for $C_P = 5$ on the tilt angle θ_{ML} of the ML of sector antenna pattern ($\Delta\varphi_{ML} = 60^\circ$) for different $\Delta\theta_{ML}$

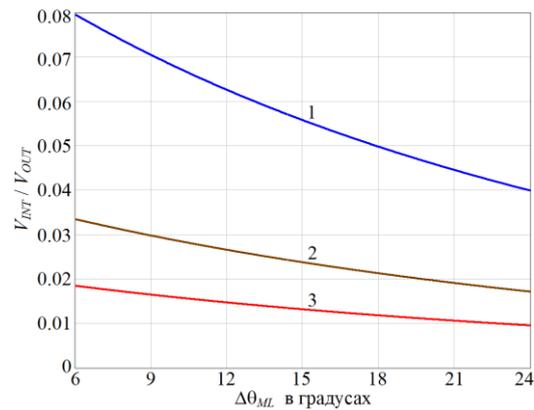


Рис. 6. Зависимость от $\Delta\theta_{ML}$ отношения вероятности попадания абонентской станции в интервал углов визирования $(30^\circ + \Delta\theta_{ML})/2 \leq \theta_{ML} \leq 90^\circ$ и вероятности ее попадания в интервал $\theta_{min} \leq \theta_{ML} \leq (30^\circ + \Delta\theta_{ML}/2)$

Fig. 6. Dependences on $\Delta\theta_{ML}$ of the ratio of probability of user's station hitting the range of viewing angles $(30^\circ + \Delta\theta_{ML})/2 \leq \theta_{ML} \leq 90^\circ$ and probability of it falling into the interval $\theta_{min} \leq \theta_{ML} \leq (30^\circ + \Delta\theta_{ML}/2)$

Приведенные результаты позволяют сделать следующие выводы.

1. Пространственная избирательность ЭМИ БС МС способна существенно влиять на интенсивность ЭМФ РЧ, создаваемого радиосетями МС на селитебной территории. Параметр U в интегральной форме отражает степень этого влияния. В зависимости от величин базовых параметров $\Delta\theta_{ML}$, $\Delta\theta_{ML}$, θ_{ML} и C_p антенн БС абсолютная величина $|U|$ может принимать значения в пределах 10–25 дБ, что на 5–20 дБ превышает параметр $1/N_s \approx 5$ дБ, который был использован в [2, 3] при пессимистических оценках интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемого совокупностью ЭМИ БС.

2. Параметр U существенно зависит от угла наклона ГЛ ДН антенн БС. На практике углы наклона ГЛ ДН антенны БС выбираются в пределах $\theta_{\min} \leq \theta_{ML} \leq 30^\circ$, $\theta_{\min} \in [1^\circ, 5^\circ]$, что обеспечивает увеличение относительной площади сечения ГЛ земной поверхностью. Учет пространственной избирательности антенн БС в вертикальной плоскости обеспечивает более адекватную оценку средней ЭМНТ (3) и средней интенсивности ЭМФ РЧ, создаваемой совокупностью БС МС на обслуживаемой территории.

3. Большинство секторных антенн БС МС диапазона УВЧ имеют коэффициенты усиления от 10–15 дБ (при $\Delta\varphi = 60^\circ\text{--}90^\circ$ и $\Delta\theta_{ML} = 12^\circ\text{--}24^\circ$) до 16–20 дБ (при $\Delta\varphi = 60^\circ\text{--}70^\circ$ и $\Delta\theta_{ML} = 5^\circ\text{--}12^\circ$); коэффициенты усиления в сравнительно узких ГЛ ЭМИ АФАР БС систем 4G/5G достигают 24–25 дБ [4, 9, 10]. Таким образом, как следует из рис. 3–5, для используемых на практике углов наклона ГЛ ЭМИ БС значение системного параметра направленности в (3) может быть равно величине, обратной коэффициенту усиления антенны БС: $U \approx 1/G_{ML}$.

Заключение

1. Результаты анализа влияния пространственной избирательности электромагнитного излучения базовой станции мобильной связи на средний уровень создаваемого ими радиочастотного электромагнитного фона подтвердили гипотезу о том, что при углах наклона главного лепестка диаграммы направленности антенн базовой станции $\theta_{ML} \leq 30^\circ$ в качестве значения параметра пространственной избирательности электромагнитного излучения базовой станции может использоваться величина, обратная коэффициенту усиления в главном лепестке диаграммы направленности антенны базовой станции.

2. Уменьшение θ_{ML} приводит к уменьшению значений U в (3), способствуя снижению среднего уровня электромагнитной нагрузки на территорию, но одновременно вызывая увеличение соканальных помех в соседних сайтах, использующих те же рабочие частоты, что приводит к росту параметра K_{CC} в (3). Поэтому интерес представляет определение оптимальных значений θ_{ML} , при которых обеспечиваются наименьшие уровни радиочастотного электромагнитного фона.

3. Поскольку средняя электромагнитная нагрузка на территорию (3) фактически определяет гигиенические ограничения на развитие инфраструктуры мобильной связи 4G/5G, интерес представляют уточнение полученных результатов с использованием более детальных моделей диаграмм направленности антенн базовой станции (включая модели на основе измерений диаграмм направленности) и верификация методик (1), (3) прогноза средней интенсивности радиочастотного электромагнитного фона для $U \approx 1/G_{ML}$ на основе экспериментальных исследований уровней радиочастотного электромагнитного фона, создаваемых системами мобильной связи в различных условиях.

References

1. Mordachev V. I. (2019) Estimation of Intensity of Electromagnetic Background, Created by Wireless Systems of Public Information Services, on the Base of Forecast of Traffic Terrestrial Density. *Doklady BGUIR*. (2), 39–49 (in Russian).
2. Mordachev V. I. (2020) Verification of Worst-Case Analytical Model for Estimation of Electromagnetic Background Created by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. of the Int. Virtual Conf. "EMC Europe 2020"*, Rome, Italy, Sept. 23–25. 6.

3. Mordachev V. I. (2021) Electromagnetic Background Generated by Mobile (Cellular) Communications. *Proc. Of the Asia Pacific Int. Symp. on EMC (Hybrid Conf.) APEMC 2021, Bali-Indonesia, Sept. 27–30.* 37–40.
4. Aspund H. et al. (2020) Advanced Antenna Systems for 5G Network Deployments. Bridging the Gap between Theory and Practice. *Academic Press.* 713.
5. Review of the Harmonised Technical Conditions Applicable to the 3.4–3.8 GHz ('3.6 GHz') Frequency Band. *CEPT Report 67, July 6, 2018.* 17.
6. White D. R. J. (1977) A Handbook Series on Electromagnetic Interference and Compatibility. *Shortcut Translation from English.* Moscow, Sov. Radio Publ. 1, 161 (in Russian).
7. Guidelines for Evaluation of Radio Interface Technologies for IMT-Advanced. *Report ITU-R M.2135-1 (12/2009).*
8. Zhang Z. et al. (2019) 6G Wireless Networks: Vision, Requirements, Architecture, and Key Technologies. *IEEE VT Magazine.* 14 (3), 28–41.
9. *AAU5613 Product Description. Huawei Technologies Co., Ltd.* 2018.
10. Beam Management Feature Parameter Description. *Huawei Technologies Co., Ltd.* 2020, 41.
11. Mordachev V. I. (2009) System Ecology of Cellular Communications. *Belarus State University Publishers Publ.* (in Russian).

Вклад авторов

Мордачев В. И. осуществил постановку задачи, разработал методику анализа, выполнил расчеты, построение графиков и анализ полученных результатов, подготовил рукопись статьи.

Ционенко Д. А. выдвинул гипотезу о связи параметров U и G_{MS} , принял участие в проверке, анализе и обсуждении полученных результатов.

Authors' contribution

Mordachev V. I. stated the research problem, developed the analysis technique, performed calculations and of graphic materials and analysis of the results obtained, prepared the article.

Tsyankenka D. A. put forward a hypothesis about the relationship between the parameters U and G_{MS} , took part in the verification, analysis and discussion of the results obtained.

Сведения об авторах

Мордачев В. И., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Ционенко Д. А., к.ф.-м.н., доцент, старший научный сотрудник Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Mordachev V. I., Cand. of Sci., Associate Professor, Leading Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsyankenka D. A., Cand. of Sci., Associate Professor, Chief Researcher of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Мордачев Владимир Иванович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 17 293-84-38
E-mail: mordachev@bsuir.by
Mordachev Vladimir Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-65-71>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.96

ОТОЖДЕСТВЛЕНИЕ СОПРОВОЖДАЕМЫХ ТРАЕКТОРИЙ И ОТМЕТОК МЕТОДОМ ПРИТЯЖЕНИЯ ПРИ ВТОРИЧНОЙ ОБРАБОТКЕ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНФОРМАЦИИ

В. А. АПОРОВИЧ

*ОАО «АГАТ – системы управления» – управляющая компания холдинга
«Геоинформационные системы управления» (г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 29.03.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье предложен новый алгоритм отождествления по координатам сопровождаемых траекторий и вновь поступивших отметок при вторичной обработке радиолокационной информации. Наибольшие трудности возникают при отождествлении в плотных группах, то есть когда расстояние между траекториями соизмеримо с ошибками измерения их координат. Обычно применяются известные методы решения задачи о назначениях, например, венгерский алгоритм и ему подобные. Общим недостатком данных методов является быстрое увеличение (пропорционально третьей или четвертой степени количества траекторий) времени решения задачи. Предлагается использовать метод «притяжения» для повышения скорости вычислений. В рассматриваемом алгоритме имитируются «притяжение» всех траекторий ко всем отметкам и взаимное «отталкивание» всех траекторий друг от друга. (Положение траекторий экстраполировано на время локации отметок.) Пошагово имитируется условное «движение» траекторий до заданного сближения с какими-либо отметками. Сравнительное моделирование алгоритма притяжения и венгерского алгоритма для случая равного количества траекторий и отметок показало, что качественные характеристики алгоритмов примерно одинаковы, но время выполнения для алгоритма притяжения растет медленнее, чем для венгерского (пропорционально квадрату количества траекторий). Поэтому при большом их количестве (более 100–300) алгоритм притяжения выполняется значительно быстрее. Очевидно, что при соответствующей корректировке величины и размерностей параметров новый алгоритм может быть использован для решения других задач о назначениях.

Ключевые слова: радиолокационная информация, вторичная обработка, отождествление, задача о назначениях, метод притяжения.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Апович В. А. Отождествление сопровождаемых траекторий и отметок методом притяжения при вторичной обработке радиолокационной информации. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 65–71.

ASSOCIATION OF THE TRACKED TRAJECTORIES AND MARKS BY THE ATTRACTION METHOD DURING SECONDARY PROCESSING OF RADAR INFORMATION

ULADZIMIR A. APAROVICH

*OJSC “AGAT – Control Systems” – Managing Company of “Geoinformation Control Systems Holding”
(Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 29.03.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The article proposes a new algorithm for associating the tracked trajectories and newly received marks by coordinates during the secondary processing (track-while-scan) of radar information. It is known that the biggest difficulties arise when associating in dense groups, that is, when the distance between the trajectories is commensurate with the errors in measuring their coordinates. Usually, well-known methods for solving the assignment task are used, for example, the Hungarian algorithm and similar. A common disadvantage of these methods is a rapid increase (in proportion to the third or fourth degree of the number of trajectories) in the time for solving the task. The article proposes to use the “attraction” method to increase the speed of calculations. The proposed algorithm simulates the “attraction” of all trajectories to all marks and the mutual “repulsion” of all trajectories from each other (the position of the trajectories is extrapolated to the time of location of the marks.) The conditional “movement” of the trajectories is simulated step by step until a set approach to any marks happens. Comparative modeling of the attraction algorithm and the Hungarian algorithm in the case of equal number of trajectories and marks showed that the qualitative characteristics of the algorithms are approximately the same, but the execution time for the attraction algorithm grows more slowly than for the Hungarian algorithm (in proportion to the square of the number of trajectories). Therefore, with a large number of them (more than 100–300), the attraction algorithm is executed much faster. Obviously, with the corresponding adjustment of the value and dimensions of the parameters, the new algorithm can be used to solve other assignment tasks.

Keywords: radar information, secondary processing, association, assignment task, attraction method.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Aparovich U. A. Association of the Tracked Trajectories and Marks by the Attraction Method During Secondary Processing of Radar Information. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 65–71.

Введение

Отождествление сопровождаемых траекторий и вновь поступивших отметок по координатам является одной из важных операций вторичной обработки радиолокационной информации. Большие сложности возникают при отождествлении в плотных группах, т. е. когда расстояние между сопровождаемыми траекториями соизмеримо с ошибками измерения их координат [1–3]. В этом случае применяются известные методы решения задачи о назначениях [1, 3, 4]. Общим недостатком применяемых методов является резкий рост объема вычислений при увеличении объема задачи. Например, при использовании венгерского алгоритма (ВА) объем вычислений растет пропорционально третьей-четвертой степени объема задачи [3].

Существенного ускорения (в лучшем случае – в 2–3 раза при сохранении кубической зависимости) по сравнению с ВА не достигается в случае применения других алгоритмов: аукциона, генетического и прочих [4–6]. Большого быстродействия можно добиться при отождествлении траекторий и отметок (далее – объектов) за счет использования принципа притяжения, аналогично описанному в [7–9].

Алгоритм отождествления

Предлагаемый алгоритм отождествления построен на основе имитации «притяжения» всех траекторий ко всем отметкам и взаимного «отталкивания» всех траекторий друг от друга. Будем считать, что траектории уже экстраполированы на время локации отметок. Теперь «движение» траекторий будет условным, и их скорости перед началом учета «притяжения» и «отталкивания» на каждом шаге равны нулю. Процесс «движения» траекторий показан на рис. 1.

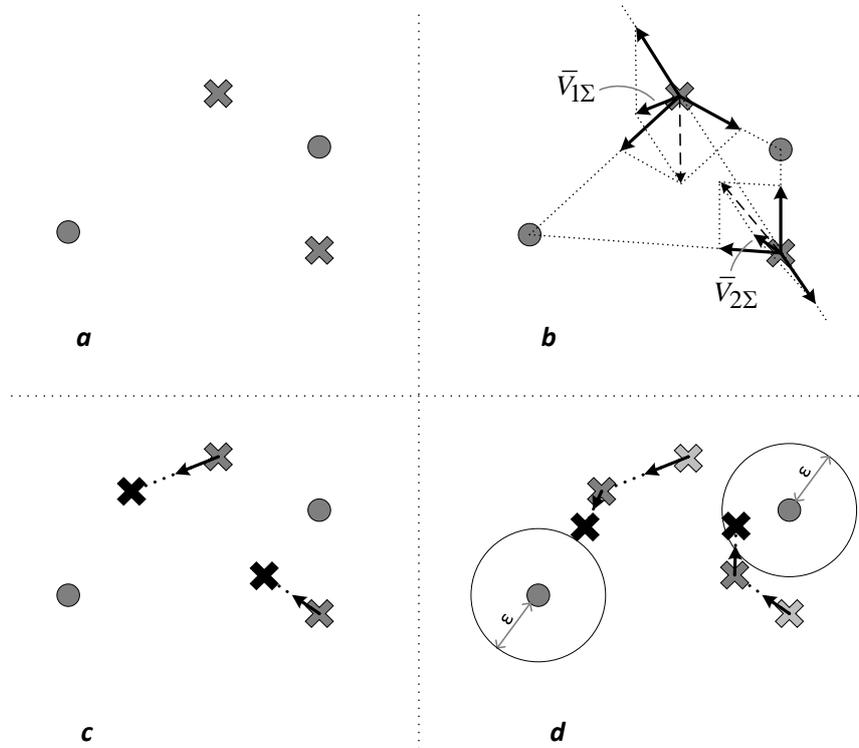


Рис. 1. Процесс «движения» траекторий
Fig. 1. The “movement” of trajectories

На рис. 1, *a* показано исходное положение объектов. Кружками обозначены вновь поступившие отметки, крестиками – траектории. На рис. 1, *b* показан расчет суммарных скоростей сближения (отталкивания).

Будем считать, что объекты попарно сближаются (разлетаются) со скоростью с модулем v_k . Величина v_k – константа и не зависит от расстояния между объектами. Значение суммарного вектора скорости для каждой j -й траектории на каждом шаге получается путем векторного сложения всех скоростей сближения и разлета

$$\bar{v}_{j\Sigma} = \sum_i \bar{v}_{i,j} + \sum_{j_1, j_1 \neq j} \bar{v}_{j,j_1},$$

где $\bar{v}_{j\Sigma}$ – суммарная скорость j -й траектории; $\bar{v}_{i,j}$ – скорость сближения i -й отметки и j -й траектории (с модулем v_k); \bar{v}_{j,j_1} – скорость разлета j -й и j_1 -й траекторий (с модулем v_k).

Далее все траектории перемещаются на величину $\bar{v}_{j\Sigma}\Delta t$, где Δt – длительность шага (некоторая константа, рис. 1, *c*).

На последующих шагах (рис. 1, *b-d*) действия повторяются через Δt . На рис. 1, *d* одна из траекторий сблизилась с отметкой на расстояние, меньшее заданного ϵ . В этом случае происходит отождествление данной траектории j и i -й отметки. Пара $i-j$ из дальнейшего рассмотрения исключается. Далее повторяются действия, как на рис. 1, *b-d*, до завершения процесса, т. е. пока все пары не отождествятся.

Моделирование и его результаты

Для оценки предложенного алгоритма притяжения (АП) проведено его моделирование, которое выполняли в двумерной рабочей области размерами $\Delta X = \Delta Y = \Delta$. Количество траекторий равно количеству отметок j_m .

Размер рабочей области определим следующим образом: $\Delta = \Delta_{mid} \sqrt{j_m}$, где Δ_{mid} – среднее расстояние между траекториями (задается как входной параметр для моделирования).

Эталонные (точные) значения координат траекторий и соответствующих отметок имитировались как случайные значения прямоугольных координат X, Y , равномерно распределенные по рабочей области.

Измеренные (случайные) значения координат траекторий и отметок получались из эталонных добавлением нормально распределенных ошибок с нулевым средним и среднеквадратическим отклонением (СКО) $\sigma_j = \sigma_i = \sigma/\sqrt{2}$, где σ – некоторое суммарное СКО.

Константы АП следующие: $v_k = 100$ м/с, $\Delta t = 1$ с, $\varepsilon = \sigma/2$.

На рис. 2 показан пример «движения» траекторий при работе АП для следующих значений входных параметров: $\Delta_{mid} = 1000$ м; $j_m = 50$; $\sigma = 300$ м. Точками отмечено последовательно изменяющееся положение траекторий при сближении, крестиками – положение отметок (звездочка – центр системы координат).

Качество работы АП оценивали по следующим параметрам:

- вероятность P правильного отождествления траекторий и отметок (по эталону);
- среднее отклонение отметок от эталонов, соответствующих траекториям, отождествленным с данными отметками ΔD ;
- время выполнения расчетов ΔT .

Для сравнения проведено моделирование ВА, описанное в [10], которое выполняли в среде MATLAB. Результаты моделирования отражены в табл. 1–3. В табл. 1 приведены значения параметров P , ΔD и ΔT для АП и ВА при различных j_m , в табл. 2 – P и ΔT при различных σ , в табл. 3 – P и ΔT при различных Δ_{mid} , в табл. 4 – параметров P и ΔT при различных j_m для большой плотности траекторий. В таблицах для наглядности введен параметр E , характеризующий «плотность» траекторий в пространстве по отношению к величине ошибки σ :

$$E = \frac{\sigma}{\Delta_{mid}}.$$

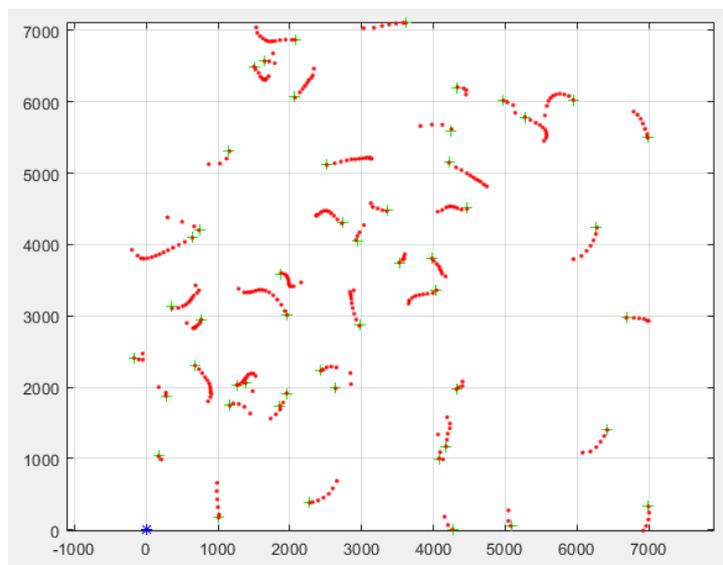


Рис. 2. Пример «движения» траекторий при работе алгоритма притяжения
Fig. 2. An example of the “movement” of trajectories when the attraction algorithm works

Таблица 1. Значения параметров P , ΔD , ΔT для алгоритма притяжения и венгерского алгоритма при различных j_m

Table 1. P , ΔD , ΔT parameter values for the attraction algorithm and the Hungarian algorithm for various j_m

$\Delta_{mid} = 1000$ м, $\sigma = 300$ м ($E = 0,3$)							
j_m		250	300	500	1000	1500	2000
P	АП	0,748	0,770	0,722	0,707	0,730	0,730
	ВА	0,752	0,773	0,750	0,723	0,750	0,765
ΔD , м	АП	279	293	303	305	300	296
	ВА	275	304	293	299	293	286
ΔT , с	АП	1,70	2,99	7,71	29,76	65,50	114,75
	ВА	0,49	1,39	8,35	95,46	554,6	1476,2

Таблица 2. Значения параметров P и ΔT при различных σ и E

Table 2. P and ΔT parameter values for various σ and E

$\Delta_{mid} = 1000$ м, $j_m = 500$						
σ , м		100	300	500	1000	2000
E		0,1	0,3	0,5	1	2
P	АП	0,976	0,722	0,432	0,144	0,060
	ВА	0,972	0,750	0,466	0,150	0,052
ΔT , с	АП	3,032	7,71	10,76	9,96	9,73
	ВА	0,700	8,35	26,17	36,67	52,81

Таблица 3. Значения P и ΔT при различных Δ_{mid} и E

Table 3. P and ΔT values for various Δ_{mid} and E

$\sigma = 300$ м, $j_m = 500$						
Δ_{mid} , м		100	300	500	1000	2000
E		3	1	0,6	0,3	0,15
P	АП	0,034	0,152	0,328	0,722	0,932
	ВА	0,026	0,150	0,346	0,75	0,944
ΔT , с	АП	2,59	4,28	7,03	7,71	6,46
	ВА	68,27	40,13	30,16	8,35	1,56

Таблица 4. Значения параметров P и ΔT при различных j_m для большой плотности траекторий

Table 4. P and ΔT parameter values for various j_m for high trajectory density

$\Delta_{mid} = 300$ м, $\sigma = 300$ м ($E = 1$)							
j_m		100	250	300	500	1000	1500
P	АП	0,22	0,136	0,177	0,152	0,149	0,143
	ВА	0,22	0,176	0,177	0,150	0,138	0,141
ΔT , с	АП	0,36	1,54	1,81	4,28	16,94	40,1
	ВА	0,12	3,79	7,00	40,13	664,4	3592,7

Анализ результатов моделирования

Данные табл. 1–4 позволяют сделать следующие выводы.

1. Значения качественных показателей, т. е. вероятности правильного отождествления P и среднего отклонения ΔD для АП и ВА практически равны при разных значениях j_m , σ , Δ_{mid} .

2. Время выполнения расчетов ΔT для АП значительно меньше при увеличении количества траекторий j_m , чем для ВА (табл. 1, 4). При этом при малых значениях j_m ВА работает быстрее, чем АП. Однако при $j_m > 100$ –300 (зависит от плотности) проявляется преимущество АП в скорости.

3. Анализ табл. 1, 4 показывает, что время выполнения для АП увеличивается пропорционально примерно квадрату количества траекторий j_m ; для венгерского алгоритма – пропорционально кубу или четвертой степени. Например, при увеличении j_m с 500 до 1000 (в два раза) время выполнения ΔT для АП увеличивается в 3,8–3,95 раза, а для венгерского алгоритма – в 11,4–16,5 раза.

4. При большой плотности АП работает быстрее, чем ВА. Например, при $j_m = 1500$ и $E = 0,3$ (табл. 1) время выполнения для АП и ВА составило соответственно 65,5 с и 554,6 с, для $j_m = 1500$, $E = 1$ (табл. 4) – соответственно 40,1 с и 3592,7 с. То есть при увеличении плотности более чем в три раза время выполнения для АП даже несколько уменьшилось, а для ВА увеличилось в 6,5 раза.

Заключение

Предложенный алгоритм притяжения обеспечивает большее быстродействие при выполнении операции отождествления траекторий и отметок (более 100–300) по сравнению с венгерским алгоритмом при сохранении других качественных показателей. Алгоритм притяжения может быть использован при вторичной обработке радиолокационной информации в случае большого количества сопровождаемых траекторий. Очевидно, что данный алгоритм также можно применять в решении других задач о назначениях при соответствующей корректировке величин и размерности параметров.

Список литературы

1. Коновалов, А. А. Основы траекторной обработки радиолокационной информации / А. А. Коновалов. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013.
2. Кузьмин, С. З. Основы теории цифровой обработки радиолокационной информации / С. З. Кузьмин. М.: Советское радио, 1974.
3. Blackman, S. Design and Analysis of Modern Tracking Systems / S. Blackman, R. Popoli // Artech House. Boston – London, 1999.
4. Солонар, А. С. Особенности применения алгоритма аукциона для решения задачи отождествления на этапе вторичной обработки радиолокационной информации / А. С. Солонар, А. А. Михалковский // Вестник Полоцкого государственного университета. Серия С. Фундаментальные науки. 2014. № 4. С. 95–102.
5. Апович, В. А. Характеристики алгоритмов оптимизации, используемых при решении задачи отождествления траекторий и отметок / В. А. Апович, В. С. Дудко, А. И. Минов // MILEX.INNOVATIONS-2019: 8-я Междунар. научная конф. по военно-техн. вопр., проблемам обороны и безопасности, использ. технологий двойного примен., 16–17 мая 2019 г., г. Минск. Минск, 2019. Ч. 5. Лаборатория интеллекта. 8 с.
6. Нигодин, Е. А. Генетический алгоритм решения задачи о назначениях / Е. А. Нигодин, Е. Е. Полупанова, А. С. Поляков // ResearchGate. Апрель 2019. С. 1–9.
7. Карпенко, А. П. Современные алгоритмы поисковой оптимизации. Алгоритмы, вдохновленные природой / А. П. Карпенко. М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2014.
8. Апович, В. А. Экстраполяция методом притяжения при отождествлении траекторий и отметок в системе вторичной обработки радиолокационной информации / В. А. Апович, Р. В. Бондаренко // Доклады БГУИР. 2014. № 4. С. 35–40.
9. Апович, В. А. Отождествление траекторий с помощью метода притяжения при третичной обработке радиолокационной информации / В. А. Апович, А. В. Шевченко // Доклады БГУИР. 2016. № 6. С. 35–39.
10. Bourgeois, F. An Extension of the Munkres Algorithm for the Assignment Problem to Rectangular Matrices / F. Bourgeois, J.-C. Lassalle // Communications of the ACM. 1971. Vol. 14. P. 802–806.

References

1. Konovalov A. A. (2013) *Bases of the Trajectory Processing of Radar Information*. St.-Petersburg: SPbGATU “LATI” (in Russian).
2. Kuzmin S. Z. (1974) *Bases of Theory of Radar Information Digital Processing*. Moscow, Sovetskoe Radio Publ. (in Russian).
3. Blackman S., Popoli R. (1999) *Design and Analysis of Modern Tracking Systems*. Artech House. Boston – London.
4. Solonar A., Mikhalkovski A. (2014) The Peculiarities of Auction Algorithm Application for the Solution of Identification Task at the Stage of Secondary Treatment of Radiolocating Information. *Polotsk State University Newsletter. C Series. Fundamental Sciences*. (4), 95–102 (in Russian).

5. Aparovich U., Dudko U., Minau A. (2019) The Characteristic of Optimization Algorithms Used in Solving the Problem of Trajectories and Marks Association. *MILEX.INNOVATIONS 2019: the 8th International Scientific Conference on Military-Technical Issues, Defense and Security Issues, the Use of Dual-Use Technologies, Minsk, May 16–17, 2019*. Minsk, Part 5. Intelligence Lab, 8.
6. Nigodin E. A., Polupanova E. E., Polyakov A. S. (2019) *Genetic Algorithm for Solving the Assignment Problem*. *ResearchGate*. 1–9.
7. Karpenko A. P. (2014) Modern Algorithms of Search Optimization. Nature-Inspired Algorithms. *Moscow, Publishing House of MSTU named after N. E. Bauman*.
8. Aparovich U. A., Bondarenko R. V. (2014) Extrapolation by Attraction Method for Identification of Tracks and Plots in System of Secondary Radar Information Processing. *Reports of BSUIR*, (4), 35–40 (in Russian).
9. Aparovich U. A., Shevchenko A. V. (2016) Correlation of Tracks from Different Radars in Information Processing by Attraction Method. *Reports of BSUIR*, 6, 35–39 (in Russian).
10. Bourgeois F., Lassalle J.-C. (1971) An Extension of the Munkres Algorithm for the Assignment Problem to Rectangular Matrices. *Communications of the ACM*, 14, 802–806.

Сведения об авторе

Апорович В. А., к.т.н., начальник сектора
ОАО «АГАТ – системы управления» –
управляющая компания холдинга
«Геоинформационные системы управления».

Адрес для корреспонденции

220114, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 117
ОАО «АГАТ – системы управления» –
управляющая компания холдинга
«Геоинформационные системы управления»
Тел. +375 29 569-41-49
E-mail: aporovich@agat.by
Апорович Владимир Андреевич

Information about the author

Aparovich U. A., Cand. of Sci., Section Chief
of Open Joint-Stock Company “AGAT – Control
Systems” – Managing Company of “Geoinformation
Control Systems Holding”.

Address for correspondence

220114, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 117
Open Joint-Stock Company “AGAT –
Control Systems” – Managing Company
of “Geoinformation Control Systems Holding”
Tel. +375 29 569-41-49
E-mail: aporovich@agat.by
Aparovich Uladzimir Andreevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-72-80>

Оригинальная статья
Original paper

УДК [004.415.53+004.42]:621.382.2/3-027.45

МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ВРЕМЕНИ ТЕСТИРОВАНИЯ КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ НАДЕЖНОСТИ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРИБОРОВ

В. О. КАЗЮЧИЦ, С. М. БОРОВИКОВ, Е. Н. ШНЕЙДЕРОВ

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20.07.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Планируемая к разработке компьютерная программа KLASS предназначена для работы в составе программного комплекса АРИОН-плюс и позволяет выполнять автоматизированную оценку надежности изделий электроники, включая полупроводниковые приборы. На этапе планирования работ по созданию программы KLASS, как модуля комплекса АРИОН-плюс, возник вопрос о рабочем времени, отводимом на процедуру тестирования компьютерной программы. Описанные в научной литературе подходы, используемые для оценки эксплуатационной надежности компьютерных программ с учетом их тестирования, исходят из того, что написан и отлажен программный код и имеются определенные данные о результатах тестирования компьютерной программы. Разработчики программного обеспечения еще до начала выполнения работ по написанию программного кода хотели бы знать прогнозное время тестирования, обеспечивающее заданную эксплуатационную надежность компьютерной программы. На основе анализа экспериментальных данных о надежности компьютерных программ разных областей применения предложена модель определения времени тестирования, необходимого для обеспечения эксплуатационной надежности программ. Модель использована для планируемой к разработке компьютерной программы KLASS и учитывает язык программирования, объем программного кода, быстродействие процессора компьютера и область применения программы. На основе полученной модели построена номограмма с двумя бинарными полями, позволяющая быстро определить прогнозное время тестирования компьютерных программ.

Ключевые слова: компьютерные программы, эффективность тестирования, время тестирования, эксплуатационная надежность программ, полупроводниковые приборы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках договоров (проектов) на выполнение научно-исследовательских работ № Т20МВ-026 на тему «Прогнозирование эксплуатационной надежности мощных полупроводниковых приборов с использованием методов и алгоритмов машинного обучения» и № Ф20МВ-021 «Статистические модели надежности прикладных программных средств и их использование для оценки ожидаемой безотказности компьютерных программ на ранних этапах их разработки» в соответствии с решением Научного совета Белорусского республиканского фонда фундаментальных исследований (протокол № 1 от 22.04.2020).

Для цитирования. Казючиц В. О., Боровиков С. М., Шнейдеров Е. Н. Модель прогнозирования времени тестирования компьютерной программы автоматизированной оценки надежности полупроводниковых приборов. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 72–80.

MODEL FOR PREDICTION OF TESTING TIME OF A COMPUTER PROGRAM FOR AUTOMATED RELIABILITY EVALUATION OF SEMICONDUCTOR DEVICES

VLADISLAV O. KAZIUCHYTS, SERGEI M. BOROVIKOV, EVGENI N. SHNEIDEROV

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20.07.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The KLASS computer program planned for development is designed to work as a part of the ARION-plus software package and allows you to perform an automated assessment of the reliability of electronic products, including semiconductor devices. At the stage of work planning on the creation of the KLASS program, as a module of the ARION-plus complex, the question arose about the working time allotted for the procedure for testing a computer program. The approaches described in the scientific literature used to assess the operational reliability of computer programs, taking into account their testing, proceed from the fact that the program code has been written and debugged and there are certain data on the results of testing the computer program. Software developers would like to know the predicted testing time, which ensures a given operational reliability of a computer program, even before starting work on writing program code. Based on the analysis of the experimental data on the reliability of computer programs in various fields of application, a model is proposed for determining the testing time required to ensure the operational reliability of programs. The model was used for the computer program KLASS planned for development and takes into account the programming language, the amount of program code, the speed of the computer processor, and the scope of the program. Based on the obtained model, a nomogram with two binary fields was constructed, which allows one to quickly determine the predicted time for testing computer programs.

Keywords: computer programs, testing efficiency, testing time, operational reliability, semiconductor devices.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The article was prepared as part of the project No. T20MB-026 on the topic “Predicting the operational reliability of powerful semiconductor devices using machine learning methods and algorithms” and No F20MV-021 “Statistical models of the reliability of applied software and their use to assess the expected reliability of computer programs at the early stages of their development” in accordance with the decision approved by the Scientific Council of the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research (Protocol No 1 dated 22.04.2020).

For citation. Kaziuchyts V. O., Borovikov S. M., Shneiderov E. N. Model for Prediction of Testing Time of a Computer Program for Automated Reliability Evaluation of Semiconductor Devices. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 72–80.

Введение

Компьютерные программы, разрабатываемые для современных информационных систем, могут содержать тысячи и даже миллионы строк кода. После написания программного кода и устранения явных ошибок (синтаксических, например), вызываемых нарушением грамматики языка программирования, программа характеризуется начальным уровнем надежности, который обычно не отвечает требованиям пользователя. Поэтому необходима процедура тестирования программы. В программах указанного объема даже после выполнения их тестирования всегда содержатся скрытые ошибки, наличие которых определяет эксплуатационную надежность программ. Обеспечить идеальную эксплуатационную надежность компьютерных программ при большом объеме кода не представляется возможным из-за того, что при тестировании не удастся в проектные сроки проверить функционирование алгоритма компьютерной программы с учетом всех возможных трасс и ветвей проведения вычислительного процесса, особенности вводимых исходных данных. При тестировании стремятся устранить критические ошибки с точки зрения правильности результата работы программы, уменьшить долю скрытых ошибок и, тем самым, обеспечить требования заказчика к эксплуатационной надежности разрабатываемой компьютерной программы.

Алгоритм компьютерной программы

Планируемая к разработке компьютерная программа KLASS предназначена для функционирования в качестве модуля в составе программного комплекса АРИОН-плюс, созданного в рамках выполнения НИР на кафедре проектирования информационно-компьютерных систем в Белорусском государственном университете информатики и радиоэлектроники [1]. В качестве информационной основы алгоритма компьютерной программы KLASS использованы описанные в [2–6] методы и модели прогнозирования надежности полупроводниковых приборов (ППП) по их информативным параметрам с определением класса работоспособности экземпляров на заданную наработку: K_1 – класс работоспособных экземпляров, K_0 – класс неработоспособных экземпляров.

Основные функциональные задачи, возлагаемые на компьютерную программу KLASS, понятны из описания этапов автоматизированного решения задачи прогнозирования надежности ППП по их информативным параметрам.

1. Ввод с клавиатуры или электронных носителей результатов обучающего эксперимента для рассматриваемого типа ППП в виде матрицы, включающей результаты измерений электрических параметров, предполагаемых на информативность, с указанием для каждого экземпляра номера класса с учетом его работоспособности по результатам испытаний для заданной наработки t_n : 1 – класс работоспособных экземпляров, 0 – класс неработоспособных экземпляров. Размер матрицы $n \times (q+1)$, где n – объем обучающей выборки (до 1000 экземпляров); q – число электрических параметров, проверяемых на информативность (до 100 электрических параметров).

2. Определение для электрических параметров (обозначим их через x_i) степени информативности по выбираемому критерию ($i = 1, 2, \dots, q$):

- коэффициенту линейной парной корреляции электрического параметра x_i с номером класса экземпляра (1 или 0) по результатам испытаний;
- информационной мере Кульбака, определяемой по [3, 4];
- количеству информации о классе экземпляра K_S ($S = 1; 0$), получаемой от контроля (измерения) электрического параметра x_i [3, 4].

В последнем случае информативный электрический параметр x_i вначале преобразуется по определенным правилам [3–6] в кодовый сигнал τ_i с последующим определением вероятностей принадлежности экземпляра к классам K_1 и K_0 при условии, что по результатам преобразования x_i в код получено конкретное значение кодового сигнала τ_i .

3. Формирование обучающей выборки в виде матрицы размером $n \times (k + 1)$, где k – число электрических параметров, выбранных в качестве информативных. Элементами этой матрицы являются кодовые сигналы, полученные по результатам преобразования x_i в кодовые сигналы τ_i ($i = 1, 2, \dots, k$) по правилам, приводимым в [3–6]. В случае использования третьего критерия этапа 2 кодовые сигналы уже получены. При использовании первых двух критериев, указанных в этапе 2, получение кодовых сигналов τ_i и указанных условных вероятностей выполняется на данном этапе.

4. Подсчет для каждого экземпляра обучающей выборки частной информации о принадлежности экземпляра обучающей выборки к классу K_1 (обозначим как $I(K_1 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)})$) и к классу K_0 (обозначим как $I(K_0 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)})$), содержащейся в сообщении о том, что по результатам преобразования информативных параметров j -го экземпляра $x_1^{(j)}, x_2^{(j)}, \dots, x_k^{(j)}$ в кодовые сигналы $\tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)}$ для этого экземпляра получен конкретный набор кодовых сигналов.

Этот этап следует рассматривать в качестве машинного обучения, поскольку для каждого экземпляра обучающей выборки определяется количество информации о близости экземпляра к классам K_1 и K_0 . В данном случае особенность машинного обучения, включающего преобразование информативных параметров с учетом их закономерностей в кодовые сигналы, и определение для каждого экземпляра обучающей выборки частной информации о принадлежности его к классам K_1 и K_0 , состоит в следующем:

– для экземпляров в действительности класса K_1 частная информация $I(K_1 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)})$ о принадлежности к классу K_1 оказывается в основном положительной, а частная информация $I(K_0 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)})$ о принадлежности к классу K_0 – в основном отрицательной;

– для экземпляров в действительности класса K_0 положительной в основном оказывается информация $I(K_0 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)})$, а отрицательной – частная информация $I(K_1 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)})$.

5. Определение для каждого j -го экземпляра обучающей выборки значения прогнозирующей функции $F^{(j)}$:

$$F^{(j)} = I(K_1 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)}) - I(K_0 | \tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)}). \quad (1)$$

Получение на основе функции (1) прогнозирующего правила, показывающего, как по набору кодовых сигналов j -го экземпляра ($\tau_1^{(j)}, \tau_2^{(j)}, \dots, \tau_k^{(j)}$) принимать решение о классе этого экземпляра для заданной наработки t_n . Теоретически порогом разделения классов является значение $F = 0$. При $F^{(j)} > 0$ должно приниматься решение о принадлежности экземпляра к классу K_1 , а при $F^{(j)} < 0$ – к классу K_0 .

6. Определение класса экземпляра обучающей выборки по прогнозу, используя прогнозирующую функцию $F^{(j)}$ при значении порога $F = 0$.

7. Подсчет ожидаемых характеристик качества прогнозирования с использованием для обучающей выборки данных о действительном классе и классе экземпляра по прогнозу. Оценка интересующих характеристик выполняется методами, описанными в [3, 4].

8. Корректировка прогнозирующего правила, полученного при выполнении этапа 5, и улучшение характеристик прогнозирования путем смещения порога F влево или вправо от нуля (оптимизация порога F).

9. Применение полученного прогнозирующего правила для прогнозирования класса однотипных экземпляров, не являющихся представителями обучающей выборки. Это позволит из новых выборок (партий) однотипных ППП отбирать экземпляры, отвечающие требованию надежности для заданной наработки t_n (экземпляры класса K_1), или же выполнять отбраковку экземпляров, не отвечающих требованию надежности для наработки t_n (экземпляры класса K_0).

Оценка надежности компьютерной программы

В качестве показателя надежности компьютерной программы будем рассматривать (согласно ГОСТ 27.205–1997) интенсивность проявления скрытых ошибок, оставшихся в программе при ее разработке. Оценка ожидаемой надежности прикладной компьютерной программы KLASS, реализующей описанные этапы процедуры прогнозирования надежности ППП, может быть дана с помощью подхода, изложенного в [7].

Для оценки прогнозной эксплуатационной интенсивности проявления скрытых ошибок прикладной компьютерной программы ($\lambda_{\text{экс}}$) с учетом быстродействия R процессора компьютера, изменчивости исходных данных и рабочей нагрузки, которую будет воспринимать компьютерная программа со стороны эксплуатационной среды, использована модель [7]:

$$\lambda_{\text{экс}} = \frac{60}{Q} K_{\Sigma} \frac{R}{B} F_0 L \cdot 10^{-6}. \quad (2)$$

В этой модели:

– коэффициент Q назван эффективностью тестирования, показывающей, во сколько раз уменьшается интенсивность отказов компьютерной программы после выполнения ее тестирования ($\lambda_{\text{экс}}$) относительно начальной интенсивности отказов λ_0 ;

– коэффициент K_{Σ} показывает увеличение интенсивности отказов из-за суммарного действия изменчивости входных данных и рабочей нагрузки на компьютерную программу со стороны факторов эксплуатационной среды (ввод данных, использование принтера, ожидание операций в очереди и т. д.);

– величина B представляет количество выполняемых процессором команд (операторов) компьютерной программы;

– произведение $F_0 L = N_0$ является прогнозным значением числа скрытых ошибок в компьютерной программе до выполнения ее тестирования; F_0 представляет начальную плотность ошибок в компьютерной программе, а L – прогнозное значение объема компьютерной программы в строках исполняемого кода.

Прогнозное число строк кода L компьютерной программы KLASS составляет примерно 20 тыс. строк (в англоязычном варианте $L = 20$ KLOC). Программу планируется использовать на компьютере, имеющем процессор с пиковым быстродействием $R = 500 \cdot 10^6$ операций/с.

Прогнозное количество команд B компьютерной программы найдено как

$$B = LE_L E_{ц}, \quad (3)$$

где E_L – коэффициент расширения кода программы, который определяется языком программирования; $E_{ц}$ – коэффициент увеличения числа выполняемых процессором команд за счет наличия в программе циклов, ветвлений и других особенностей.

Согласно [7], принято $E_L = 10$. Путем экспертной оценки для разрабатываемой компьютерной программы KLASS с учетом наихудшего пути ее выполнения принято $E_{ц} = 20$. В качестве K_{Σ} выберем среднее значение, характерное для прикладных компьютерных программ: $K_{\Sigma} = 8,83$ [7]. Значение базовой (усредненной) плотности ошибок A , используемой для расчета F_0 , примем равной 0,0087 ошибок / строка кода (строка «Среднее» [8]). Само значение F_0 найдено по модели

$$F_0 = A \prod_i K_i, \quad (4)$$

где K_i – коэффициенты (их называют метриками), учитывающие влияние на плотность ошибок особенностей проектной организации, квалификации и опыта программистов, характеристик компьютерной программы (новизна, сложность, средства разработки, степень использования стандартных модулей).

С учетом [7] и постановления Министерства труда и социальной защиты Республики Беларусь от 27.06.2007 № 91 «Об утверждении укрупненных норм затрат труда на разработку программного обеспечения» для компьютерной программы KLASS выбраны коэффициенты K_i и получены значения $F_0 \approx 0,056$ ошибка/строка кода, $\lambda_0 = 74,2 \text{ ч}^{-1}$.

Среднее время одного прогона компьютерной программы в часах (ч) определим как

$$t_{пр} = \frac{LE_L E_{ц}}{3600 \cdot 0,7R}, \quad (5)$$

где множитель 3600 – коэффициент перевода быстродействия процессора в размерность «операций/ч»; множитель 0,7 – средний коэффициент, учитывающий реальное быстродействие процессора относительно пикового значения R .

В формулу (5) значение R следует подставлять в размерности «операций/с». В данном случае $L = 20\,000$ строк кода, $E_L = 10$, $E_{ц} = 20$, $R = 500 \cdot 10^6$ операций/с. По формуле (5) получим $t_{пр} = (20\,000 \cdot 10 \cdot 20) / (3600 \cdot 0,7 \cdot 500 \cdot 10^6) \approx 3,17 \cdot 10^{-6}$ ч.

С учетом нагрузки эксплуатационной среды на программу (ввод и корректировка данных, вывод информации на печать, запись информации на электронные носители и т. п.) примем прогнозное число прогонов компьютерной программы KLASS при решении задач прогнозирования надежности ППП в течение трех рабочих месяцев, равным 1500 раз, что соответствует процессорному времени $t_{пр,мес} = 3,17 \cdot 10^{-6} \cdot 1500 = 0,00477$ ч. Вероятность отсутствия факта проявления ошибки программы (до выполнения тестирования) в течение трех рабочих месяцев составит

$$P(t_{пр,мес}) = \exp(-\lambda_0 \cdot t_{пр,мес}) = \exp(-74,2 \cdot 0,00477) \approx 0,702,$$

что в данном случае не является удовлетворительным результатом.

Актуальность разработки модели прогнозирования времени тестирования

Для практического применения компьютерной программы KLASS значение вероятности $P(t_{пр,мес})$ должно быть не менее 0,9, что обеспечивается при $\lambda_{экс} \leq 22,1 \text{ ч}^{-1}$. Значение $\lambda_{экс}$ может быть достигнуто при коэффициенте эффективности тестирования $Q = \lambda_0 / \lambda_{экс} = 74,2 / 22,1 \approx 3,36$.

Возникает вопрос, как спрогнозировать процессорное время тестирования программы KLASS, необходимое для получения требуемого коэффициента эффективности тестирования $Q = 3,36$ и, следовательно, какое календарное время в рабочих человеко-днях потребуется для выполнения тестирования компьютерной программы, чтобы достичь значения $\lambda_{экс} \leq 22,1 \text{ ч}^{-1}$, после чего компьютерная программа предположительно будет отвечать требованию эксплуатационной надежности и ее можно будет использовать для решения практических задач?

Методика исследований. Модель прогнозирования времени тестирования

После написания кода компьютерной программы и устранения нарушений правил языка программирования она характеризуется начальной интенсивностью проявления ошибок λ_0 . При завершении тестирования интенсивность проявления ошибок уменьшается и должна соответствовать эксплуатационному значению $\lambda_{\text{экс}}$. Для достижения $\lambda_{\text{экс}}$ необходимо при тестировании обеспечить требуемый коэффициент эффективности тестирования Q :

$$Q = \frac{\lambda_{\text{экс}}}{\lambda_0} = \frac{N_0}{N_{\text{п.тест}}}, \quad (6)$$

где $N_{\text{п.тест}}$ – число скрытых ошибок, оставшихся в компьютерной программе после выполнения ее тестирования.

Величина $N_{\text{п.тест}}$ в (6) определяется по формуле

$$N_{\text{п.тест}} = N_0 - n_{\text{обн}}, \quad (7)$$

где $n_{\text{обн}}$ – общее число ошибок, выявленных на этапе тестирования компьютерной программы, зависит от времени выполнения тестирования.

Методика определения времени тестирования, которое для компьютерной программы позволит достичь значения Q , основана на том, что величину $n_{\text{обн}}$, входящую в (7), необходимо выразить через время тестирования t и затем полученное уравнение решить относительно t .

В [9] отмечается, что значение $n_{\text{обн}}$ может быть определено с помощью экспоненциальной функции суммарного времени t прогона компьютерной программы при ее тестировании:

$$n_{\text{обн}} = N_0 \left[1 - \exp\left(-\frac{\lambda_0}{N} t\right) \right], \quad (8)$$

где N – общее число ошибок в компьютерной программе, которые теоретически могут проявиться при ее тестировании, $N \approx N_0$.

В формуле (8) величина t является процессорным временем выполнения компьютерной программы. Зная значение t , можно найти календарное время.

Принимая во внимание (6)–(8) и учитывая примерное равенство $N \approx N_0$, получим

$$Q = \frac{N_0}{N_{\text{п.тест}}} = \frac{N_0}{N_0 \exp\left(-\frac{\lambda_0}{N_0} t\right)} = \exp\left(\frac{\lambda_0}{N_0} t\right). \quad (9)$$

Записывая начальную интенсивность проявления ошибок λ_0 по модели Муса [9] с учетом быстродействия R процессора компьютера и приводимого в [7] описания коэффициента C этой модели, выражение (9) примет вид

$$Q = \exp\left(\frac{\lambda_0}{N_0} t\right) = \left| \begin{array}{l} \lambda_0 = C \frac{R}{LE_L E_u} N_0, \\ C = C_B K_\Sigma \end{array} \right| = \exp\left(\frac{C_B K_\Sigma \frac{R}{LE_L E_u} N_0}{N_0} t\right) = \exp\left(\frac{C_B K_\Sigma R}{LE_L E_u} t\right), \quad (10)$$

где C_B – базовое значение коэффициента проявления ошибок программы, не зависящее от области применения компьютерной программы.

Из выражения (10) получим модель определения процессорного времени t , необходимого для обеспечения требуемого коэффициента эффективности тестирования Q :

$$t = \frac{LE_L E_u \ln(Q)}{C_B K_\Sigma R}. \quad (11)$$

Представим модель (11) в другом, более удобном виде, подставив в нее приводимое в [7] значение $C_B = 0,238 \cdot 10^{-7}$ 1/ошибка и следующие коэффициенты:

– $3600 \cdot 10^6$ – множитель для R , обеспечивающий для процессорного времени t размерность в часах (ч) и использование для R размерности «млн операций/с», то есть, если $R = 500 \cdot 10^6$ операций/с, то в качестве R следует подставлять число 500;

– 0,7 – множитель, учитывающий действительное быстродействие процессора относительно его пикового значения R , приводимого в технической документации.

Тогда модель (11) примет вид

$$t = \frac{L E_L E_{\text{ц}} \ln(Q)}{60 K_{\Sigma} R}. \quad (12)$$

Модель (12) позволяет определить процессорное время t , необходимое для обеспечения требуемого коэффициента эффективности тестирования Q и, следовательно, заданной эксплуатационной интенсивности $\lambda_{\text{экс}}$ проявления скрытых ошибок компьютерной программы.

Результаты исследований и их обсуждение

Для быстрого определения и анализа влияния параметров модели (12) на значение процессорного времени тестирования t была построена номограмма с двумя бинарными полями (рис. 1), которую можно использовать как для планируемой к разработке компьютерной программы KLASS, так и для других прикладных компьютерных программ, выбирая в зависимости от их назначения усредненное значение коэффициента K_{Σ} [7].

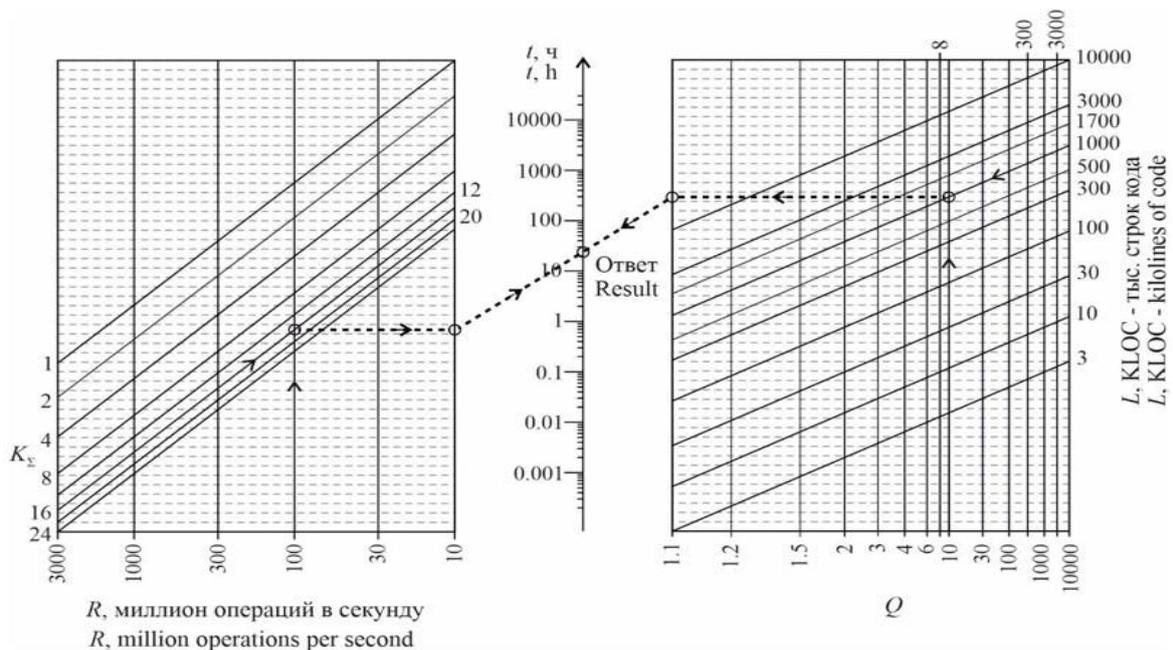


Рис. 1. Номограмма определения времени тестирования прикладных компьютерных программ
Fig. 1. Nomogram for determining the time for testing applied computer programs

Правила использования номограммы для получения значения процессорного времени t понятны из примера (рис. 1), в котором использованы следующие значения величин: $K_{\Sigma} = 16$; $R = 100$ млн операций/с, $L = 1000$ тыс. строк кода, $Q = 10$. Значение t , полученное по номограмме, примерно равно 23...25 ч и соответствует коэффициентам $E_L = 1$ и $E_{\text{ц}} = 1$. Выбор E_L определяется языком написания программного кода, например для Си $E_L \geq 2,5$; для Fortran, Cobal $E_L \geq 3,0$; для Ada $E_L \geq 4,5$; для Си++ $E_L \geq 6,0$. В случае неопределенности рекомендуется принять $E_L = 10$ [7]. Значение $E_{\text{ц}}$ выбирается на основе экспертной оценки с учетом особенностей входных данных, наличия в компьютерной программе циклов, ветвлений и условных переходов. При использовании номограммы найденное значение t следует умножить на произведение $E_L E_{\text{ц}}$.

Экспериментальные данные, приведенные в [8], позволили получить средний процент процессорного времени в общем календарном времени этапа тестирования прикладных

компьютерных программ в предположении, что для тестирования используются общепринятые методы и технологии и общее календарное время тестирования составляет 40 и более процентов от всего календарного времени, планируемого на разработку программы. Для прикладных компьютерных программ, используемых для управления производственными процессами, этот показатель составил примерно 14 %, а среднее значение по прикладным компьютерным программам всех областей применения – 12 %, что хорошо согласуется с числом (примерно 15 %), указанным IT-специалистами НАН Беларуси.

Календарное рабочее время тестирования $T_{\text{календ}}$ для компьютерной программы, используемой в сфере управлениями производственными процессами, определится как

$$T_{\text{календ}} = \frac{100t}{14} \approx 7,1t. \quad (13)$$

Используя модель (12) и формулу (13), для планируемой к разработке программы KLASS получено: $t = 25,5$ ч; $T_{\text{календ}} = 181,0$ ч, что примерно соответствует одному месяцу при пятидневной рабочей неделе. Числа получены при следующих значениях параметров: $K_{\Sigma} = 8,83$; $R = 500$ млн операций/с; $L = 20\,000$ строк кода; $E_L = 10$; $E_{\Sigma} = 20$; $Q = 3,36$.

Заключение

Предложена модель определения времени тестирования прикладных компьютерных программ для обеспечения их заданной эксплуатационной надежности. Модель использована для определения времени тестирования планируемой к разработке компьютерной программы KLASS, предназначенной для работы в составе программного комплекса АРИОН-плюс для автоматизированной оценки надежности изделий электроники, включая полупроводниковые приборы, по значениям их информативных параметров. На основе предложенной модели построена номограмма с двумя бинарными полями, позволяющая при необходимости проследить изменение процессорного времени тестирования в зависимости от быстродействия процессора компьютера, области применения программы (коэффициента K_{Σ}), объема программного кода, коэффициента эффективности тестирования.

Список литературы

1. Разработка методики прогнозирования надежности электронных устройств для системы АРИОН / С. М. Боровиков [и др.] // Доклады БГУИР. 2011. № 4. С. 93–100.
2. Боровиков, С.М. Индивидуальное прогнозирование надежности транзисторов большой мощности для электронных устройств медицинского назначения / С. М. Боровиков, В. О. Казючиц // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 1. С. 88–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-88-95>.
3. Боровиков, С. М. Статистическое прогнозирование для отбраковки потенциально ненадежных изделий электронной техники / С. М. Боровиков. М.: Новое знание, 2013.
4. Прогнозирование надежности изделий электронной техники / С. М. Боровиков [и др.]. Минск: МГВРК, 2010.
5. Метод прогнозирования надежности изделий электронной техники / С. М. Боровиков [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. 2006. Т. 50, № 4. С. 105–109.
6. Прогнозирование надежности изделий электронной техники методом пороговой логики / С. М. Боровиков [и др.] // Доклады БГУИР. 2006. № 2. С. 49–56.
7. Оценка ожидаемой надежности прикладных программных средств для компьютерных информационных систем / С. М. Боровиков [и др.] // Информатика. 2021. Т. 18, № 1. С. 84–95. <https://doi.org/10.37661/1816-0301-2021-18-1-84-95>.
8. Software Reliability, Measurement, and Testing Guidebook for Software Reliability Measurement and Testing [Electronic Resource] / J. A. McCall [et al.]. 1992. Mode of access: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a256164.pdf>. Date of access: 20.04.2022.
9. Шубинский, И. Б. Функциональная надежность информационных систем. Методы анализа / И. Б. Шубинский. М.: Журнал Надежность, 2012.

References

1. Borovikov S. M., Shneiderov E. N., Matyushkov V. E., Tsyrelchuk I. N. (2011) Development of a Method for Predicting the Reliability of Electronic Devices for the ARION System. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. (4), 93–100 (in Russian).
2. Borovikov S. M., Kazyuchicz V. O. (2021) Individual Prediction of the Reliability of Semiconductor Devices for Electronic Devices of Medical Purposes. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 19 (1), 88–95. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-1-88-95> (in Russian).
3. Borovikov S. M. (2010) *Statistical Forecasting for the Rejection of Potentially Unreliable Electronic Products*. Moscow, New Knowledge Publ. (in Russian).
4. Borovikov S. M., Tsyrelchuk I. N., Shneiderov E. N., Beresnevich A. I. (2010) *Predicting the Reliability of Electronic Products*. Minsk, MGVRK Publ. (in Russian).
5. Borovikov S. M., Beresnevich A. I., Khmyl A. A., Emelyanov A. V., Tsyrelchuk I. N. (2006) Method for Predicting the Reliability of Electronic Products. *Doklady Natsional'noi Akademii Nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 50 (4), 105–109 (in Russian).
6. Borovikov S. M., Beresnevich A. I., Khmyl A. A., Emelyanov A. V., Tsyrelchuk I. N. (2006) Predicting the Reliability of Electronic Products Using the Threshold Logic Method. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. (2), 49–56 (in Russian).
7. Borovikov S. M., Kazyuchits V. O., Khoroshko V. V., Dik S. S., Klinov K. I. (2021) Estimation of the Expected Reliability of Applied Software for Computer Information Systems. *Informatics = Informatics*. 18 (1), 84–95. <https://doi.org/10.37661/1816-030.1-2021-18-1-84-95> (in Russian).
8. McCall J. A. et al. (1992) *Software Reliability, Measurement, and Testing Guidebook for Software Reliability Measurement and Testing*. Available at: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a256164.pdf> (Accessed 20 April 2022).
9. Shubinsky I. B. (2012) *Functional Reliability of Information Systems. Analysis Methods*. Moscow, Magazine Reliability Publ. (in Russian).

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Казючиц В. О., м.т.н., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Боровиков С. М., к.т.н., доцент, доцент кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Шнейдеров Е. Н., к.т.н., доцент, проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kazyuchyts V. O., M. Sci, Postgraduate of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Borovikov S. M., Cand. of Sci., Associate professor of the Department of Information and Computer Systems Design of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Shneiderov E. N., Cand. of Sci., Vice-Rector for Academic Affairs of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел. +375 17 293-88-38
E-mail: bsm@bsuir.by
Боровиков Сергей Максимович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel. +375 17 293-88-38
E-mail: bsm@bsuir.by
Borovikov Sergei Maksimovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-81-87>

Оригинальная статья / Original paper

УДК 004.383:621.391

МНОГОПОТОЧНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ СВЕРТКИ НА ОСНОВЕ БЛОЧНЫХ МЕТОДОВ

А. В. ШАРАМЕТ

*«КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 07.06.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Рассмотрена многопоточная реализация свертки на основе блочных методов. Свертка по своей сути является основой множества методов, которые решают задачу определения степени схожести или независимости двух процессов, иными словами, когда необходимо определить степень корреляции. Алгоритм свертки выполняется с существенной задержкой, так как для его выполнения необходимо накопить весь сигнал и после этого осуществить обработку. Анализ показал, что одним из возможных способов снижения временных затрат является многопоточная реализация свертки на основе блочных методов. Раскрыты основные особенности реализации выполнения свертки методом перекрытия со сложением и методом перекрытия с добавлением, а также приведены численные примеры. Полученные результаты показывают, что применение данных методов без использования оконной функции приводит к возникновению существенных искажений в спектре сигнала. Предложена универсальная схема выполнения свертки на основе многопоточной обработки блока входных данных. Это позволяет достичь хорошего компромисса между вычислительной сложностью, архитектурой системы и временными затратами.

Ключевые слова: свертка, реальный масштаб времени, метод перекрытия со сложением, метод перекрытия с добавлением, оконная функция, многопоточная обработка.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Шарамет А. В. Многопоточная реализация свертки на основе блочных методов. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7), С. 81–87.

MULTITHREADED CONVOLUTION IMPLEMENTATION BASED ON BLOCK METHODS

ANDREI V. SHARAMET

JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 07.06.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. A multithreaded convolution implementation based on block algorithms is considered. Convolution is essentially the basis of many methods that solve the problem of determining the degree of similarity

or independence of two processes, in other words, when it is necessary to determine the degree of correlation. The algorithm itself is executed with a significant delay, because for its execution it is necessary to accumulate the entire signal and then process it. The analysis showed that one of the possible ways to reduce time costs is a multithreaded implementation of convolution based on block algorithms. The article shows the main features of the convolution implementation by the overlap method with addition and the overlap method with addition, as well as numerical examples. The results obtained show that the application of these methods without the use of a window function leads to significant distortions in the signal spectrum. Based on the results of the analysis, a universal scheme for performing convolution based on multithreaded processing of an input data block is proposed. This allows to achieve a good compromise between computational complexity, system architecture, and time costs.

Keywords: convolution, real time scale, overlap method with addition, overlap method with addition, window function, multithreaded processing.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Sharamet A. V. Multithreaded Convolution Implementation Based on Block Methods. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 81–87.

Введение

Реализация свертки при обработке дискретных сигналов является одной из самых важных процедур в цифровой обработке сигналов. При этом большинство существующих на практике аппаратных реализаций сверток предполагает, что размер блока входных данных существенно превышает размер импульсной характеристики. Проведенный анализ показывает, что существует несколько подходов по ее реализации. В рамках первого подхода [1–3] осуществляется последовательная обработка блока входных данных по мере их поступления. Это делает вычислительную сложность минимальной и не зависимой от аппаратной реализации. С другой стороны, аппаратные затраты и задержка пропорционально увеличиваются с увеличением размера блока входных данных. В приложениях, работающих в реальном масштабе времени, или при обработке сигналов с большой базой такая задержка становится неприемлемой и должна быть уменьшена [1, 4]. Эти аппаратные затраты связаны с необходимостью выполнения дополнительных операций по вводу/выводу и временному хранению данных которые становятся сопоставимы с затратами на непосредственное выполнение свертки. Другим возможным вариантом снижения времени выполнения этой процедуры является параллельная обработка [4, 5] нескольких блоков входных данных меньшего размера с их последующим объединением. Такой подход позволяет распределить вычислительные ресурсы по времени с учетом доступности блока входных данных и законченности промежуточных результатов.

Постановка задачи

Рассматриваемая операция может быть выполнена на основе линейной свертки, круговой свертки или дискретного преобразования Фурье (ДПФ). В основе быстрых алгоритмов вычисления свертки лежит ДПФ. Это позволяет выполнить операцию быстрее, чем путем прямых вычислений [6, с. 507]. Результат свертки двух дискретных последовательностей описывается выражением

$$y(n) = h(k) * x(n) = \sum_{k=0}^{M-1} h(k)x(n-k), \quad (1)$$

где $x(n)$ – входная дискретная последовательность; $h(k)$ – импульсная характеристика фильтра.

Поскольку линейная фильтрация выполняется над ограниченным во времени объемом данных, он может быть разбит на набор отдельных блоков фиксированной длины. После этого каждый блок обрабатывается параллельно и далее обработанные результаты объединяются вместе для формирования единой выходной последовательности одним из двух методов: методом перекрытия с добавлением или методом перекрытия со сложением. Это позволяет

выполнить операцию фильтрации с использованием многопоточных программно-аппаратных систем цифровой обработки.

Представим длинную последовательность входных данных $x(n)$ в виде набора блоков длиной P . Для выполнения фильтрации на основе ДПФ необходимо учесть, что его длину желательно выбирать исходя из выполнения условия $P+Q-1 \leq 2^N$. Тогда входной блок данных может быть записан в виде

$$x(n) = \begin{cases} x(n-kP), & \text{при } n=1, 2, \dots, P \\ 0. & \end{cases} \quad (2)$$

Это позволяет входной блок данных (2) представить в виде суммы коротких сверток

$$y(n) = h(k) * x(n) = \sum_{k=0}^{Q-1} h(k) * x(n-kP) = \sum_{k=0}^{Q-1} y(n-kP). \quad (3)$$

Так как вычислительная сложность круговой свертки по сравнению с линейной выше [6], то:

$$y(n) = \text{IDFT}(\text{DFT}(h(k))\text{DFT}(x(n))), \quad (4)$$

где DFT – дискретное преобразование Фурье; IDFT – обратное DFT.

Основная часть

Метод перекрытия со сложением [1, 3]. Пусть свертка имеет длину Q . Тогда результатом ее выполнения на основе линейной свертки входного блока данных длиной P является последовательность длиной $P+Q-1$. Чтобы выполнить линейную свертку на основе круговой, необходимо линейную преобразовать в круговую свертку путем дополнения ее нулями (рис. 1), пока их длина не будет равна длине линейной свертки, т. е. $P+Q-1$.

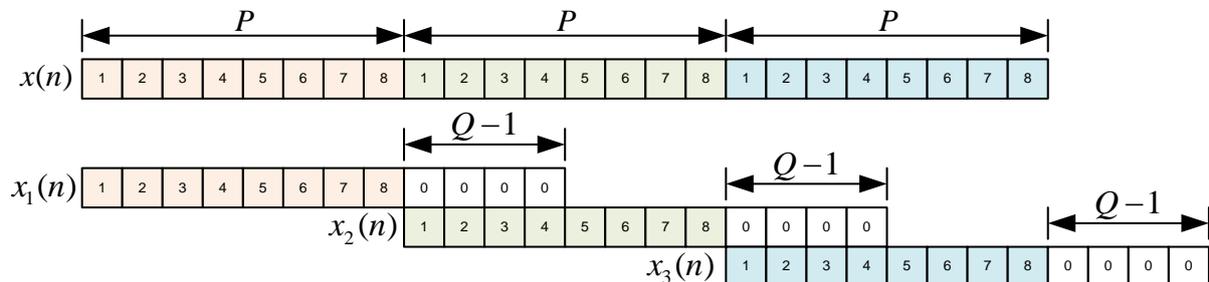


Рис. 1. Параллельная обработка методом перекрытия со сложением

Fig. 1. Parallel processing by the overlap-save method

После этого осуществляется поэлементное сложение данных.

Численный пример. В качестве примера рассмотрим фильтр с импульсной характеристикой $h(k)=[4\ 3\ 2\ 1]$, размер которой составляет $Q=4$, и входные данные $x(n)=[1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 1\ 2\ 3\ 4\ 5]$. Исходя из того, что для выполнения ДПФ желательно, чтобы размер блока был равен 2^N (примем, что размер блока $P=8$). Тогда для выполнения операции векторного умножения необходимо дополнить тремя нулями каждый из блоков ($x(n)=[1\ 2\ 3\ 4\ 5\ 0\ 0\ 0]$) и четырьмя нулями $h(k)$ ($h(k)=[4\ 3\ 2\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0]$). Результаты поэтапного выполнения свертки в соответствии с выражением (4) на примере одного блока ввиду их идентичности представлены в табл. 1.

Тогда в результате поблочного сложения формируются перекрытые блоки частных сверток, которые показаны на рис. 2.

Таблица 1. Результаты вычислений на примере одного блока
Table 1. Calculation results on the example of one block

Операция / Operation	Результат 0,8 / Result 0.8
$DFT(h(n))$	$[10,0 + i0,0; 5,4 - i4,8; 2,0 - i2,0; 2,6 - i0,8; \dots$ $\dots 2,0 + i0,0; 2,6 + i0,8; 2,0 + i2,0; 5,4 + i4,8]$
$DFT(x_1(n))$	$[15,0 + i0,0; -5,4 - i7,2; 3,0 + i2,0; -2,6 - i1,2; \dots$ $\dots 3,0 - i0,0; -2,6 + i1,2; 3,0 - i2,0; -5,4 + i7,2]$
$DFT(x_1(n))DFT(h(k))$	$[1,5 + i0,0; -0,6 - i0,1; 0,1 - i0,0; -0,1 - i0,0; \dots$ $\dots 0,1 + i0,0; -0,1 + i0,0; 0,1 + i0,0; -0,6 + i0,1]$
$IDFT(DFT(x_1(n))DFT(h(k)))$	$[4 \ 11 \ 20 \ 30 \ 40 \ 26 \ 14 \ 5]$

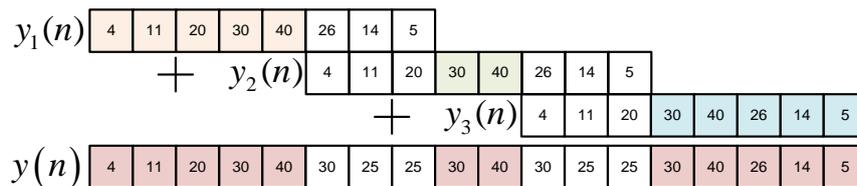


Рис. 2. Принцип формирования перекрытия
Fig. 2. The principle of overlap formation

Метод перекрытия с добавлением [1, 3]. Для каждой из P выборок из начала каждого блока в начало последующего добавляется $Q-1$ значений. При этом начало первого блока дополняется нулями, ввиду отсутствия предыдущего блока данных (рис. 3). Импульсная характеристика фильтра дополняется $Q-1$ нулями. В результате подобных трансформаций длины блоков и импульсной характеристики будут одинаковыми и составят $P+Q-1$.

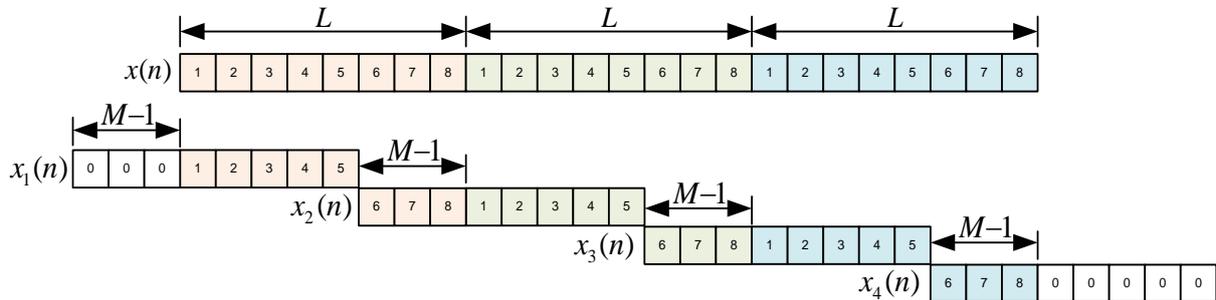


Рис. 3. Параллельная обработка методом перекрытия с добавлением
Fig. 3. Parallel processing by the overlap-add method

После этого осуществляется поэлементное дополнение данных.

Численный пример. В качестве исходных данных возьмем численные значения входных данных из предыдущего примера. Тогда первый блок данных примет вид $x_1(n) = [0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 2 \ 3 \ 4 \ 5]$. При этом результат выполнения операции $DFT(h(k))$ не изменяется (табл. 1). Результаты поэтапного выполнения свертки в соответствии с выражением (4) на примере первого блока представлены в табл. 2.

После этого из начала каждого блока удаляется начальных $Q-1$ выборок (рис 4). Особенностью реализации выражения (4) является то, что аргументом DFT являются два входных блока данных кратных 2^N . Это накладывает ограничение на его использование.

В районе стыков выходных блоков данных будут иметь место большие нелинейные искажения. Это приводит к существенным пульсациям в спектре сигнала (рис. 5, а).

Таблица 2. Результаты поблочных вычислений
Table 2. The results of block-by-block calculations

Операция / Operation	Результат / Result
$DFT(x_1(n))$	$[15, 0 + i0, 0; -1, 3 + i8, 9; -2, 0 + i3, 0; -2, 7 + i0, 9; \dots$ $\dots -3, 0 + i0, 0; -2, 7 - i0, 9; -2, 0 - i3, 0; -1, 3 - i8, 9]$
$DFT(x_1(n))DFT(h(k))$	$[1, 5 + i0, 0; 0, 4 + i0, 5; 0, 0 + i0, 1; -0, 1 + i0, 0; \dots$ $\dots -0, 1 + i0, 0; -0, 1 - i0, 0; 0, 0 - i0, 1; 0, 4 - i0, 5]$
$IDFT(DFT(x_1(n))DFT(h(k)))$	$[26 \ 14 \ 5 \ 4 \ 11 \ 20 \ 30 \ 40]$
$IDFT(DFT(x_2(n))DFT(h(k)))$	$[38 \ 39 \ 43 \ 30 \ 25 \ 25 \ 30 \ 40]$
$IDFT(DFT(x_3(n))DFT(h(k)))$	$[12 \ 25 \ 38 \ 26 \ 14 \ 5 \ 0 \ 0]$

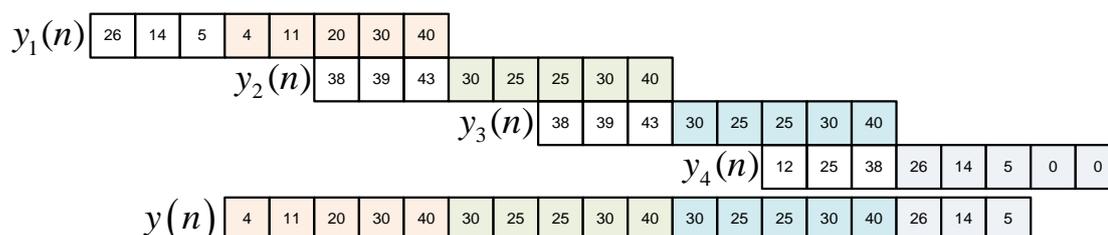


Рис. 4. Параллельная обработка методом перекрытия со сложением
Fig. 4. Parallel processing by the overlap-add method

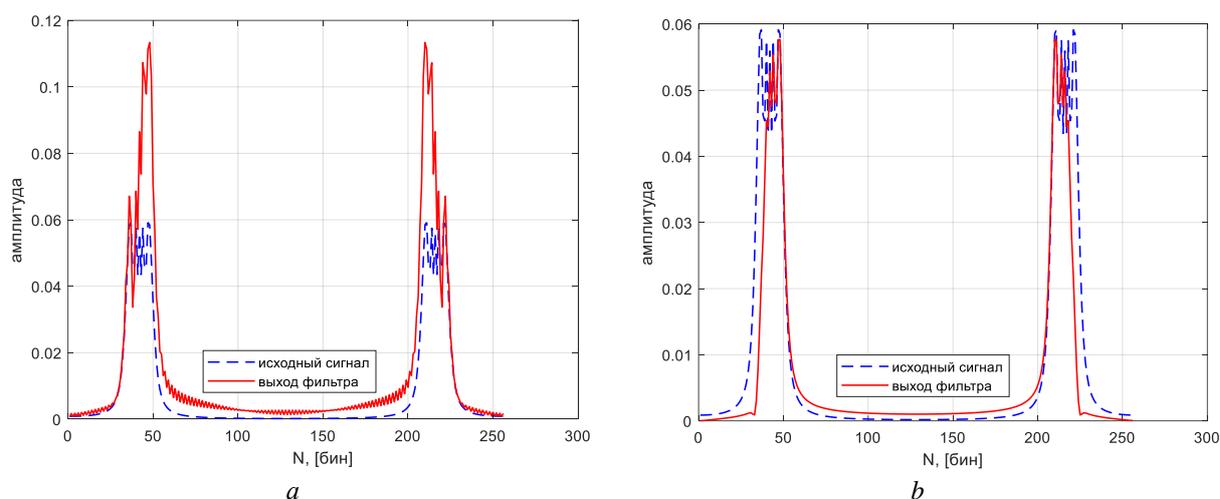


Рис. 5. Спектр сигнала на выходе: *a* – без оконной функции; *b* – с оконной функцией
Fig. 5. The spectrum of the output signal: *a* – without a window function; *b* – with a window function

Для решения данной проблемы (рис. 5, *b*) входной блок данных умножить на оконную функцию. При этом оконная функция должна удовлетворять ряду ограничений:

- быть равной нулю везде, кроме интервала 2^N ;
- иметь малый уровень боковых лепестков на краях;
- в процессе обработки сумма сдвинутых весовых функции на всем интервале обработки должна быть постоянной.

В качестве одной из возможных к применению оконных функций предлагается рассмотреть окно Ханна (Хеннинга) [6, с. 93–97] с уровнем боковых лепестков минус 31,5 дБ, которое описывается выражением:

$$w(n) = 0,5 \left(1 - \cos \left(\frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad (5)$$

где N – ширина окна.

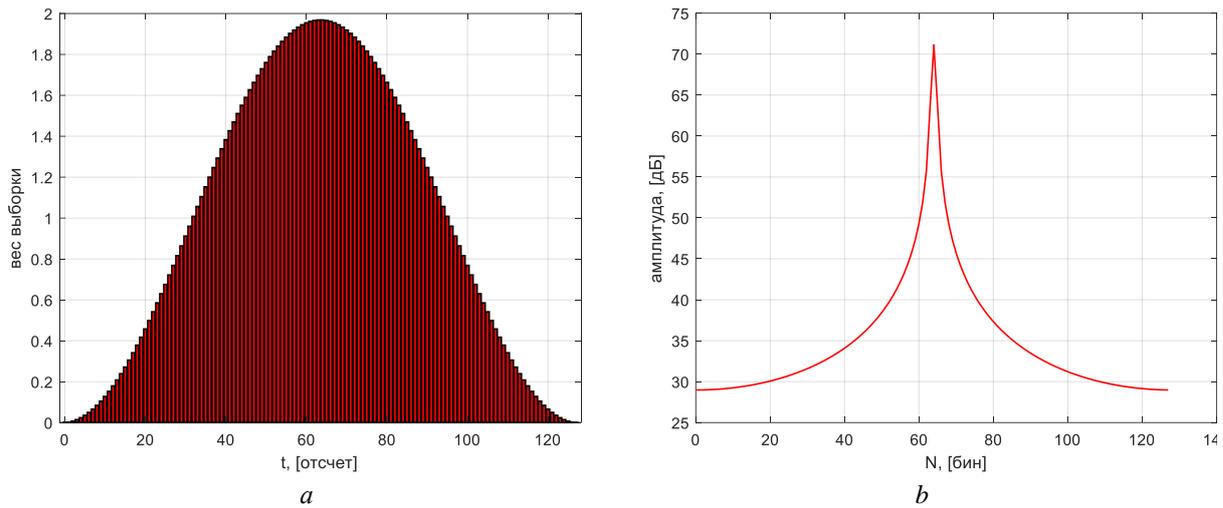


Рис. 6. Окно Ханна (Хеннинга), $N = 128$: a – оконная функция; b – спектр оконной функции
Fig. 6. Hanna (Henning) window: a – window function; b – spectrum by window function

Проведенный анализ реализации методов перекрытия со сложением и с добавлением показывает, что они эквивалентны. Кроме того, эти методы имеют схожие этапы обработки, что позволяет разбить их на потоки, представить универсальную схему выполнения свертки (рис. 7) на основе многопоточной обработки блока входных данных и тем самым существенно сократить время на ее выполнение. Для того, чтобы не загромождать рисунок, ограничимся тремя потоками.

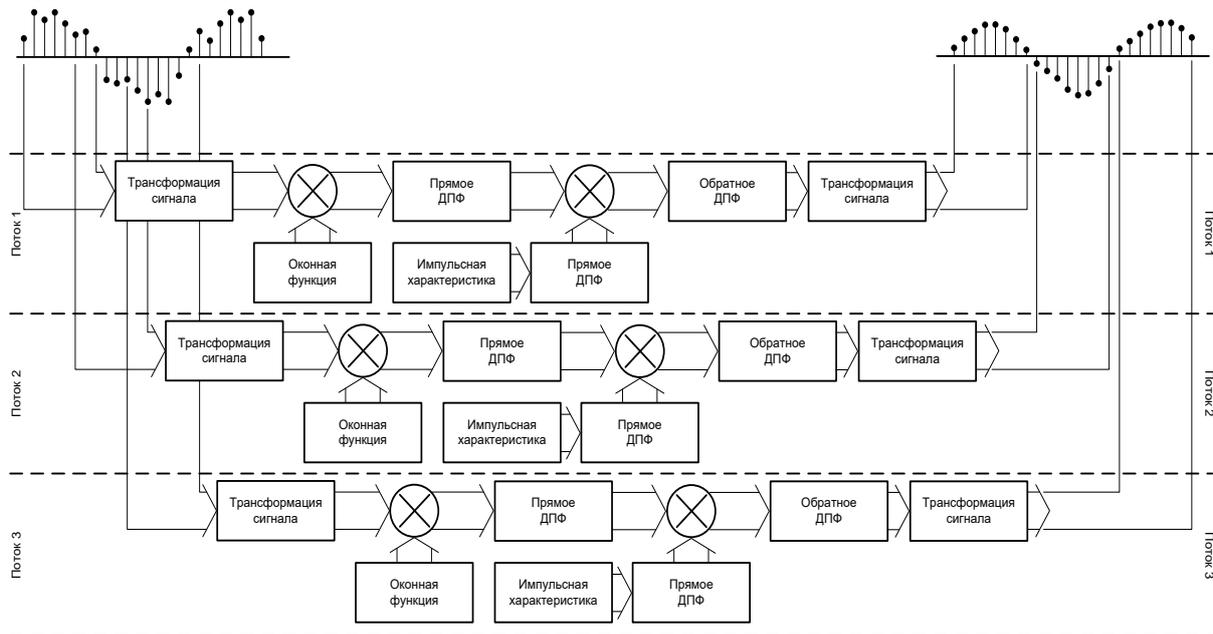


Рис. 7. Структурная схема многопоточной реализации свертки на основе блочных методов
Fig. 7. Block diagram of multithreaded convolution implementation based on block methods

Представленная схема показывает, что в каждом потоке реализован единый алгоритм, состоящий из одинакового количества этапов, а это существенно упрощает разработку программного обеспечения. Особенностью данной схемы является то, что в начале и конце обработки осуществляется этап трансформации сигнала (зависит от реализованного метода). Все остальные этапы идентичны. При этом скорость обработки увеличивается фактически в разы и определяется только количеством реализованных потоков.

Заклучение

Проведенный анализ показывает, что реализация свертки в реальном масштабе времени сопряжена с существенными временными задержками, вызванными необходимостью накопления всего сигнала и последующей обработкой. При этом разбиение входного потока данных на несколько блоков позволяет сократить данные задержки. Анализ блочных методов перекрытия со сложением и перекрытия с добавлением показал их идентичность, что подтверждается численными примерами. Это позволило разработать универсальную структурную схему многопоточной реализации свертки на основе блочных методов. Особенностью данной схемы является применение оконной функции в каждом канале, что дает возможность существенно снизить нелинейные искажения в спектре выходного сигнала, которые вызваны перекрытием блоков.

Список литературы

1. Myers, D. G. Digital Signal Processing: Efficient Convolution and Fourier Transform Techniques / D. G. Myers // Prentice-Hall, Englewood Cliffs. N.J., 1990.
2. Shaila, D. Apte, Digital Signal Processing / D. Shaila, 2nd ed. Wiley India, 2009.
3. Salivahanan, S. Digital Signal Processing / S. Salivahanan, C. Ganapriya, 2nd ed. Tata McGraw Hill, 2011.
4. Proakis, J. G. Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications / J. G. Proakis, D. G. Manolakis, 4th ed. Pearson Education, Inc., 2007.
5. Vetterli, M. Running FIR and IIR Filtering using Multirate Filter Banks / M. Vetterli // IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process. 1988. Vol. ASSP-36, No 5.
6. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. М.: Бином-прес, 2013.

References

1. Myers D. G. (1990) Digital Signal Processing: Efficient Convolution and Fourier Transform Techniques. *Prentice-Hall, Englewood Cliffs*, N.J.
2. Shaila D. (2009) *Apte, Digital Signal Processing*. 2nd ed. Wiley India.
3. Salivahanan S., Ganapriya C. (2011) *Digital Signal Processing*. 2nd ed. Tata McGraw Hill.
4. Proakis J. G., Manolakis D. G. (2007) Digital Signal Processing: Principles, Algorithms and Applications. 4th ed. *Pearson Education, Inc*.
5. Vetterli M. (1988) Running FIR and IIR Filtering using Multirate Filter Banks. *IEEE Trans. Acoust. Speech Signal Process.* ASSP-36 (5).
6. Laions R. (2013) *Cifrovaya Obrabotka Signalov*. Moskov, Binom-pres.

Сведения об авторе

Шарамет А. В., к.т.н, доцент, докторант кафедры электронных вычислительных средств Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, начальник тематического отдела ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Адрес для корреспонденции

220062, Республика Беларусь,
г. Минск, пр-т Независимости, 117а
ОАО «КБ Радар» – управляющая компания
холдинга «Системы радиолокации»
Тел. +375 29 633-68-84
E-mail: a.sharamet@kbradar.by
Шарамет Андрей Владимирович

Information about the author

Sharamet A. V., Cand. of Sci., Associate Professor, Doctoral Student at the Department of Electronic Computing of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Head of the Thematic Department of JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Address for correspondence

220062, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti Ave., 117a
JSC “KB Radar” – Managing Company of
“Radar Systems” Holding
Tel. +375 29 633-68-84
E-mail: a.sharamet@kbradar.by
Sharamet Andrei Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-88-94>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.383:621.391

СЖАТИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ФУНКЦИЙ УОЛША

А. А. БУДЬКО, Т. Н. ДВОРНИКОВА, Е. А. МИСУЛИН, Р. Ю. СНАПКО

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 19.03.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В настоящее время для передачи и хранения изображений необходимо их сжатие. В статье предлагается алгоритм гибридного сжатия, применяемый как для цветных, так и для черно-белых изображений. Он включает в себя дискретное вейвлет-преобразование и преобразование Уолша, которое используется для квантования. Коэффициенты преобразования Уолша квантуются и подвергаются арифметическому кодированию. На выходе объединенные данные находятся в сжатой форме и могут храниться на любом устройстве либо быть переданы через любую доступную сеть за самое короткое время. Сжатое изображение декодируется, и происходит декомпрессия исходного изображения с помощью операции обратного преобразования.

Ключевые слова: преобразование Уолша, сжатие изображений без потерь, вейвлет-преобразование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Будько А. А., Дворникова Т. Н., Мисулин Е. А., Снапко Р. Ю. Сжатие изображений с использованием функций Уолша. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 88–94.

IMAGE COMPRESSION USING WALSH FUNCTIONS

ANATOLI A. BUDZKO, TATYANA N. DVORNIKOVA, EGOR A. MISULIN,
ROMAN U. SNAPKO

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 19.03.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. Currently, image transfer and storage require compression. In this article, the hybrid compression algorithm is used for color/black and white images. It includes the discrete wavelet transformation and the Walsh transformation that is used for quantization. The Walsh transform coefficients are quantized and arithmetically encoded. At the output, the combined data is compressed and can be stored on any device or transmitted over any available network in the shortest time. The compressed image is decoded and the original image is decompressed using the inverse conversion operation.

Keywords: Walsh transform, lossless image compression, wavelet transform.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Budzko A. A., Dvornikova T. N., Misulin E. A., Snapko R. U. Image Compression Using Walsh Functions. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 88–94.

Введение

Для человека потребность в получении информации является постоянной. Например, в доисторическом периоде знания о ядовитых растениях, об опасных зверях и т. п. были залогом выживания для отдельного человека. Информация о том, как добывать себе еду, воду, обустроить свое жилище и т. д., – жизненно важна. Без изобретения способов передачи и обмена информацией человечество было бы обречено на вымирание. В современном мире люди располагают богатыми возможностями для создания, хранения и передачи информации. Понятия, виды, свойства информации и объем информационных ресурсов в любой области деятельности человека растут огромными темпами. Массивы передаваемой информации увеличиваются непрерывно – начиная от бытовых разговоров и заканчивая информационным потоком в интернете. Рост объема информации обусловлен усложнением всех сфер жизнедеятельности современного общества, а определяющими факторами являются развитие технологий и научный прогресс.

В условиях, когда информацию нужно передать в ограниченное время, необходимы специальные меры для увеличения пропускной способности канала связи. Известно, что информационная емкость канала оценивается выражением

$$V_k = \tau_k \Delta f_k \ln \left(\frac{P_c}{P_{ш}} \right), \quad (1)$$

где τ_k – интервал времени, в течение которого принимается сигнал; Δf_k – полоса пропускания канала; $P_c, P_{ш}$ – мощность сигнала и шума в канале.

При заданном отношении сигнал/шум и малых фиксированных значениях τ_k и Δf_k резервом увеличения объема передаваемой информации является исключение синхронизации, т. е. использование той части сигнала, которая указывает начало кода для передачи информации. В статье для квантования предлагается применять преобразования Уолша.

Функции Уолша

Функции Уолша [1] – это семейство функций, образующих ортогональную систему и принимающих значения только +1 и –1 на всей области определения; образованы они из функций Радемахера. Обработка – одно из основных достоинств преобразований в базе Уолша, однако для формирования таких функций нужны специальные генераторы. Сегодня существует большое количество схем генераторов функций Уолша. Один из возможных вариантов схемы генератора первых восьми функций представлен на рис. 1.

Алгоритм формирования функций Уолша [2] в этом генераторе основан на перемножении функций Радемахера $r_1(\theta)$, $r_2(\theta)$ и $r_3(\theta)$. Функция $r_3(\theta)$ типа меандр вырабатывается непосредственно задающим генератором и имеет максимальную частоту для используемого набора базисных функций. Функции $r_2(\theta)$ и $r_1(\theta)$ получаются при помощи триггеров со счетным входом путем деления частоты входного сигнала на 2. Для получения остальных функций Уолша в качестве умножителей используются сумматоры по модулю 2 с инверсными выходами. Следует отметить, что на выходе триггеров и схем сложения по модулю 2 напряжение имеет два уровня – 0 и 1, в то время как функции Уолша по определению имеют уровни –1 и +1. Преобразование уровней осуществляют операционные усилители, которые сравнивают входной сигнал с напряжением смещения $E_{см} = 1/2$.

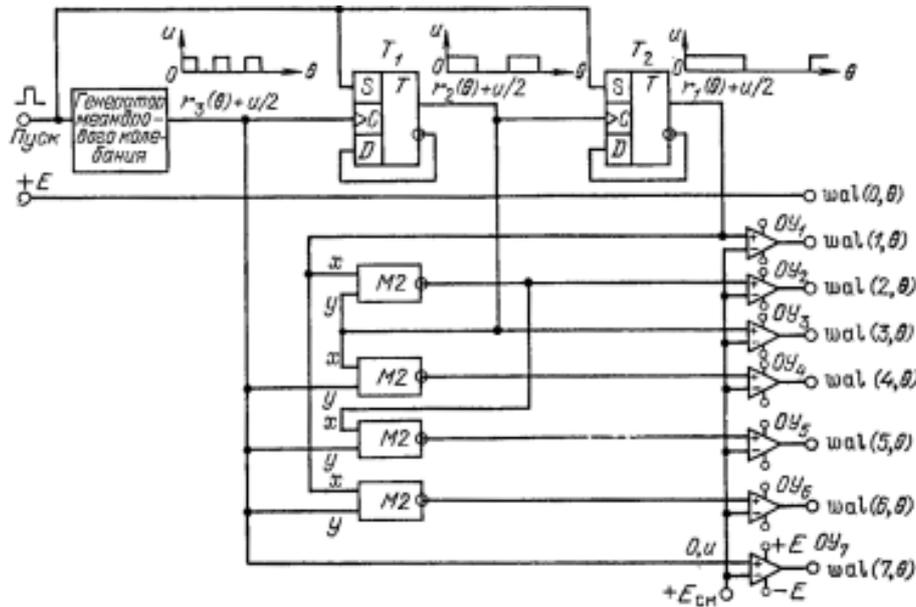


Рис. 1. Генератор первых восьми функций Уолша
Fig. 1. Generator of the first eight Walsh functions

Преобразование Уолша преобразует сигнал на набор прямоугольных или квадратных сигналов (рис. 2).

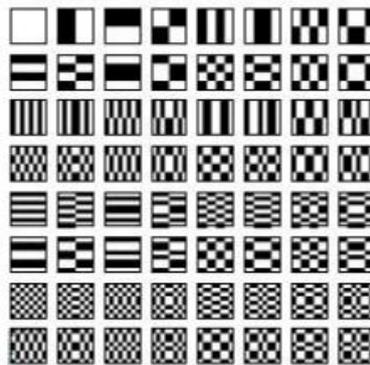


Рис. 2. Базис Уолша для изображений 8x8
Fig. 2. Walsh basis for 8x8 images

Преобразование Уолша для двумерных сигналов выглядит следующим образом:

$$T(x, y) = \frac{1}{M} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{M-1} f(u, v) \left[\prod_{i=0}^{m-1} (-1)^{(d_i(u)d_{m-1-i}(x) + d_i(v)d_{m-1-i}(y))} \right]. \quad (2)$$

Обратное преобразование Уолша определяется по формуле

$$f(u, v) = \frac{1}{M} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{M-1} T(x, y) \left[\prod_{i=0}^{m-1} (-1)^{(d_i(u)d_{m-1-i}(x) + d_i(v)d_{m-1-i}(y))} \right]. \quad (3)$$

Вейвлет-преобразование Хаара

Преобразование вейвлетов [3] разлагает сигнал на набор основных функций, называемых вейвлетами. Вейвлет-преобразование представляет собой преобразование частоты времени, вычисляет скользящие средние значения и разности посредством скалярных произведений с масштабирующими сигналами и вейвлетами. Вейвлеты не определены с точки зрения масштабирования и функций вейвлета. Вейвлет имеет сбалансированные частотные

характеристики. Вейвлеты используют перекрывающиеся окна, поэтому спектр высокочастотного коэффициента отражает все высокочастотные изменения (рис. 3). Арифметическое кодирование используется для сжатия данных без потерь. Его также называют энтропийным кодированием. Арифметическое кодирование дает почти оптимальный результат для заданного набора символов, одно из его преимуществ – адаптация. Оно преобразует поток данных в диапазон чисел с плавающей запятой (0, 1). Это также обеспечивает лучшее сжатие, поскольку всё сообщение кодируется как новый символ, а не как отдельные символы. Вейвлет Хаара является простейшим типом вейвлет-преобразования и служит моделью для других вейвлет-преобразований, обеспечивая эффективное сжатие сигналов и изображений (рис. 4).

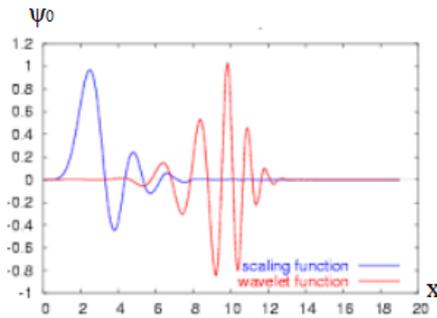


Рис. 3. Функция 2D вейвлета
Fig. 3. 2D Wavelet function

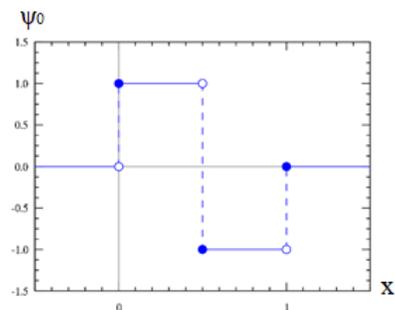


Рис. 4. Вейвлет-преобразование Хаара
Fig. 4. Haar wavelet transform

Сжатие изображений

Сжатие изображений [4] – это наука, которая занимается уменьшением количества бит, необходимых для хранения, передачи и восстановления изображений без потери информации. Техника сжатия без потерь используется для сжатия и распаковки изображения. Сжатое изображение может быть передано через облачную сеть на стороне получателя, и изображение может быть реконструировано. Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена на рис. 5, двухуровневая декомпозиция DWT – на рис. 6.

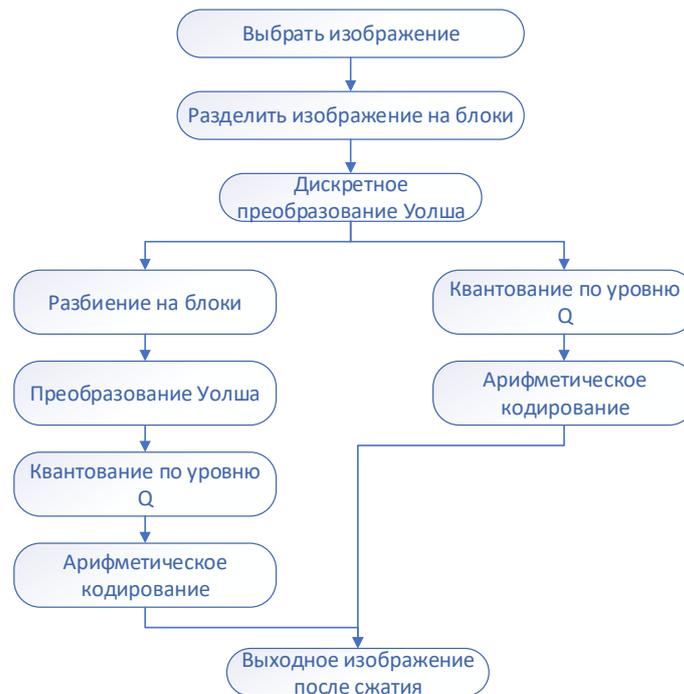


Рис. 5. Блок-схема алгоритма сжатия
Fig. 5. Block diagram of the proposed algorithm

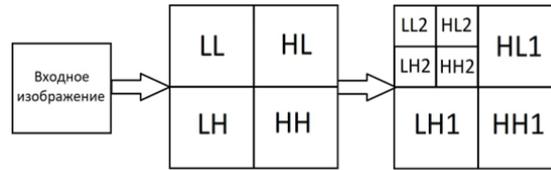


Рис. 6. Двухуровневая декомпозиция DWT
Fig. 6. Two-level decomposition of DWT

Эффективность предлагаемого алгоритма подтверждается с точки зрения показателей производительности, таких как отношение пикового значения к сигналу и шуму (PSNR), среднеквадратическая ошибка (MSE) и коэффициент сжатия (CR). Входные изображения из наборов данных показаны на рис. 7, после сжатия файл будет с расширением .wwt. На стороне приемника применяются обратные преобразования для получения реконструированного изображения (рис. 8).



Рис 7. Входное изображение
Fig. 7. Input image



Рис. 8. Реконструированное изображение
Fig. 8. Reconstructed images

PSNR [5] отражает качество реконструированного изображения и указывает на эффективность алгоритма сжатия. Среднеквадратическая ошибка MSE представляет собой среднее значение ошибки между реальным изображением I и сжатым изображением I'

$$MSE = \frac{1}{mn} \sum_{x=1}^m \sum_{y=1}^n (I(x, y) - I'(x, y))^2. \quad (4)$$

Пиковое отношение сигнал/шум PSNR используется для измерения качества между исходным и сжатым изображениями. Высокое значение PSNR дает лучшее качество сжатого и реконструированного изображений. PSNR обычно выражается формулой

$$PSNR = 20 \log_{10} \left(\frac{255}{\sqrt{MSE}} \right). \quad (5)$$

Коэффициент сжатия можно определить как отношение размера исходного изображения к размеру сжатого изображения

$$K = \frac{N_{ис.}}{N_{сж.}}. \quad (6)$$

Таблица 1. Матрица производительности для различных вейвлетов
Table 1. Performance matrix for different wavelets

Входное изображение	Отношение сигнал/шум PSNR	Среднеквадратическое отклонение MSE	$T_{сж}$	T_p	Коэффициент сжатия K
db3					
1	48,474987	3,72	7,677057	10,637286	51,32578
2	47,636765	4,39	7,793296	10,553187	47,42396
3	49,512393	2,93	7,220063	10,377102	55,23157
4	48,952306	3,34	7,817294	10,865413	49,97539
5	47,940439	4,21	7,995294	10,950095	47,12561
6	45,629887	4,38	6,365905	8,198367	38,85647

Окончание таблицы 1 / End of Table 1

haar					
1	47,42677	4,74	7,162271	10,23863	54,13286
2	46,94007	5,30	7,581140	10,39107	50,97951
3	48,24472	3,93	6,926179	9,885088	59,79658
4	47,81663	4,33	7,422946	10,30475	52,48647
5	47,37572	4,80	7,536443	10,31744	51,89783
6	43,57184	7,03	5,811217	7,750165	39,25239
coif3					
1	48,99345	3,31	7,896789	11,26030	53,18951
2	48,03012	4,13	7,909564	11,13821	50,20183
3	49,70579	2,81	7,405461	11,05338	58,76425
4	49,40175	3,01	7,988354	11,30202	53,37582
5	48,27024	3,90	8,155997	11,57530	50,09869
6	44,86736	5,22	6,785390	8,942609	34,75683
sym3					
1	48,47499	3,72	7,658239	10,72807	51,15623
2	47,76368	4,39	7,815626	10,55944	47,16854
3	49,51239	2,93	7,620959	10,52366	54,99863
4	48,95231	3,34	7,926224	10,85511	50,08605
5	47,94044	4,21	8,008160	10,86697	47,38945
6	45,62989	4,38	6,184347	8,135875	38,67824

На рис. 9 показан сравнительный анализ коэффициента сжатия для вейвлетов db3, haar, coif3, sym3. Из рисунка видно, что вейвлет-преобразование Хаара обеспечивает лучшее сжатие.

В табл. 1 приведены матрицы производительности для вейвлетов db3, haar, coif3, sym3; $T_{сж}$, T_p – прошедшее время сжатия и распаковки изображений.

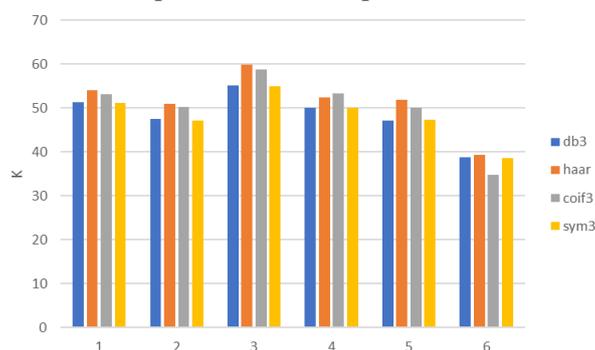


Рис. 9. Производительность коэффициента сжатия для различных вейвлетов
Fig. 9. Performance plot for compression ratio

Заключение

В статье предложен гибридный алгоритм сжатия для различного вида изображений. Вейвлет-преобразование, преобразование Уолша и арифметическое кодирование используются в совокупности для получения наилучших результатов, таких как сжатие не менее чем в 39 раз, без потерь качества при декодировании. Оценка производительности проведена по соотношению сигнал/шум, среднеквадратическому отклонению и степени сжатия. Качество восстановленного изображения соответствовало качеству исходного. Предложенный алгоритм может быть использован во многих сферах, поскольку передача изображений стала неотъемлемой частью нашей повседневной жизни.

Список литературы

1. Гоноровский, И. С. Радиотехнические цепи и сигналы / И. С. Гоноровский. М.: Радио и связь, 1986.
2. Трахтман, А. М. Основы теории дискретных сигналов на конечных интервалах / А. М. Трахтман, В. А. Трахтман. М.: Советское радио, 1975. 208 с.

3. Теория кодирования / Т. Касами [и др.], пер. с япон. А. В. Кузнецова. М.: Мир, 2006. 571 с.
4. Лосев, В. В. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов / В. В. Лосев, Е. Б. Бродская, В. И. Коржик. М.: Радио и связь, 1988.
5. Харкевич, А. А. Спектры и анализ / А. А. Харкевич. М.: Физмат, 1962.

References

1. Gonorovsky I. S. (1986) *Radio Engineering Circuits and Signals*. Moscow: Radio and Communication Publ. (in Russian).
2. Trakhtman A. M., Trakhtman V. A. (1975) *Fundamentals of the Theory of Discrete Signals at Finite Intervals*. Moscow, Soviet Radio Publ. 208 (in Russian).
3. Kasami T., Tokura N., Iwadari E., Inagaki Ya. (2006) *Coding Theory*. Transl. from Japan A. V. Kuznetsov. Moscow, Mir Publ. 571 (in Russian).
4. Losev V. V., Brodskaya E. B., Korzhik V. I. (1988) *Search and Decoding of Complex Discrete Signals*. Moscow, Radio and Communications Publ. (in Russian).
5. Kharkevich A. A. (1962) *Spectra and Analysis*. Moscow, Fizmat (in Russian).

Вклад авторов

Будько А. А. осуществил постановку задачи создания метода сжатия изображений.
Дворникова Т. Н. предложила использование функций Уолша для сжатия изображений.
Мисулин Е. А. предложил алгоритм сжатия изображений без потерь с использованием функций Уолша.
Снапко Р. Ю. предложил алгоритм восстановления сжатого изображения без потерь с использованием функций Уолша.

Authors' contribution

Budzko A. A. carried out the task of creating an image compression method.
Dvornikova T. N. proposed using of Walsh functions for image compression.
Misulin E. A. proposed an algorithm of lossless image compression using Walsh functions.
Snapko R. U. proposed an algorithm for lossless restoring of compressed image using Walsh functions.

Сведения об авторах

Будько А. А., к.т.н., доцент кафедры Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Дворникова Т. Н., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мисулин Е. А., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Снапко Р. Ю., студент Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Budzko A. A., Cand. of Sci., Associate Professor at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dvornikova T. N., M.Sci., Senior Lecturer at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Misulin E. A., Student at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Snapko R. U., Student at the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220094, Республика Беларусь,
г. Минск, просп. Рокоссовского, 18/1, кв. 387
Тел. +375 33 632-79-83
E-mail: m1sulin@yandex.by
Снапко Роман Юрьевич

Address for correspondence

220094, Republic of Belarus,
Minsk, Rokossovsky Ave., 18/1, fl. 387
Tel. +375 33 632-79-83
E-mail: m1sulin@yandex.by
Snapko Roman Ur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-7-95-101>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 159.9.072+159.9.078+612.821+331.446.4

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СПОСОБНОСТИ К ВЫРАБОТКЕ НАВЫКА РЕЛАКСАЦИИ У МАШИНИСТОВ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД

Н. В. ЩЕРБИНА

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 13.05.2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. Исследована эффективность проведения БОС-тренингов на выработку навыка релаксации с использованием аппаратно-программного комплекса NeuroDog. Навык релаксации является одним из условий поддержания функционального состояния машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад на оптимальном уровне во время рабочего рейса, а также это один из факторов успешного межрейсового отдыха. Выполнен множественный регрессионный анализ, который позволяет прогнозировать показатели, характеризующие успешность выработки навыка релаксации в зависимости от выраженности психофизиологических и личностных показателей машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад. Построены две регрессионные модели, объясняющие зависимость показателей выработки навыка достижения релаксации от психофизиологических и личностных характеристик машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад. Модели характеризуются достаточным качеством. Показатели качества: первой регрессионной модели – коэффициент детерминации $R^2 = 0,71$ (при $F(40, 65) = 4,06$, $p = 0,0000027$), статистика Дарбина-Уотсона $d = 1,81$; второй регрессионной модели – $R^2 = 0,75$ (при $F(49, 56) = 3,51$, $p = 0,0000043$), $d = 2,09$. Для прогнозирования показателей выработки навыка достижения релаксации получены регрессионные уравнения в зависимости от выраженности психофизиологических и личностных показателей машинистов локомотивных бригад.

Ключевые слова: биологическая обратная связь, электродермальная активность кожи, саморегуляция, выработка навыка релаксации, функциональное состояние, множественный регрессионный анализ, моделирование.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Автор статьи благодарит всех участников эксперимента.

Для цитирования. Щербина Н. В. Прогнозирование способности к выработке навыка релаксации у машинистов локомотивных бригад. Доклады БГУИР. 2022. 20 (7). С. 95–101.

PREDICTION OF THE ABILITY TO DEVELOP THE RELAXATION SKILL IN DRIVERS OF LOCOMOTIVE CREWS

NATALIA V. SHCHERBINA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 13.05.2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The effectiveness of biofeedback training for the development of relaxation skills using the NeuroDog hardware-software complex is investigated. The relaxation skill is one of the conditions for maintaining the functional state of drivers and assistant drivers of locomotive crews at an optimal level during a working trip, and it is also one of the factors for a successful inter-trip rest. A multiple regression analysis has been carried out, which allows to predict the indicators characterizing the success of developing the relaxation skill, depending on the severity of psychophysiological and personal indicators of drivers and assistant drivers of locomotive crews. Two regression models have been constructed to explain the dependence of the indicators of developing the skill of achieving relaxation on the psychophysiological and personal characteristics of drivers and assistant drivers of locomotive crews. Models are characterized by sufficient quality. Quality indicators: of the first regression model – coefficient of determination $R^2 = 0.71$ (with $F(40, 65) = 4.06$, $p = 0.0000027$), Durbin-Watson statistics $d = 1.81$, of the second regression model – $R^2 = 0.75$ (with $F(49, 56) = 3.51$, $p = 0.0000043$), $d = 2.09$. To predict the indicators of developing the skill of achieving relaxation, regression equations were obtained depending on the severity of psychophysiological and personal indicators of locomotive crew drivers.

Keywords: biofeedback, skin electrodermal activity, self-regulation, relaxation skill development, functional state, multiple regression analysis, modeling.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

Gratitude. The author of the article thanks all participants in the experiment.

For citation. Shcherbina N. V. Prediction of the Ability to Develop the Relaxation Skill in Drivers of Locomotive Crews. Doklady BGUIR. 2022. 20 (7), 95–101.

Введение

Исследуем способность выработки навыка релаксации с использованием биологической обратной связи на основе электродермальной активности кожи на примере машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад Белорусской железной дороги. В [1, 2] показано, что метод биологической обратной связи – эффективный способ обучения управлению функциональным состоянием человека, преимуществами которого являются неинвазивность и отсутствие противопоказаний.

На базе кабинета психологической службы Моторвагонного депо г. Минска непосредственно во время периодических обязательных переосвидетельствований машинистов с использованием УПДК-МК¹ в соответствии с утвержденным графиком проведено исследование по выработке навыка релаксации с использованием аппаратно-программного комплекса NeuroDog² [3, 4]. Результаты факторного анализа показали [4], способность к выработке навыка релаксации определяется профессионально важными психофизиологическими и личностными показателями машинистов локомотивных бригад. Результаты расчетов непараметрического Н-критерия Краскела-Уоллиса показали [5] статистически значимые различия между группами

¹ Комплекс универсальный психодиагностический УПДК-МК для профессионального психофизиологического отбора работников локомотивных бригад, диспетчеров [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://neurocom.ru/ru2/rail/updk_mk_rail.html. Дата доступа: 22.01.2021.

² Биоадаптивная игрушка NeuroDog. Руководство по эксплуатации. М.: ЗАО «Нейроком», 2009. 36 с.

машинистов по психофизиологическим и личностным показателям: концентрация внимания, шестой октант внутриличностных отношений «зависимый – послушный», время выполнения задания оценки эмоциональной устойчивости и фактор G методики Р. Б. Кеттелла «низкая – высокая нормативность поведения». Результаты дискриминантного анализа [6] позволили выявить наиболее важные дифференциально-диагностические критерии из психофизиологических и личностных показателей машинистов для диагностики успешной выработки навыка релаксации. Полученные линейные квалификационные функции [6] позволяют относить новый объект (машиниста локомотивной бригады) к соответствующей группе по успешной выработке навыка релаксации.

Цель исследований – для прогнозирования показателей выработки навыка достижения релаксации построить регрессионные модели зависимости показателей выработки навыка релаксации от психофизиологических и личностных характеристик машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад.

Методика проведения эксперимента

В исследовании приняли участие 106 машинистов (мужчин) локомотивных бригад Моторвагонного депо г. Минска в возрасте от 18 до 65 лет, средний возраст по выборке составил $(32 \pm 11,4)$ года. Стаж работы участников эксперимента – в диапазоне от 1 до 36 полных лет [3].

Для выработки навыка релаксации проводили сеансы БОС-тренинга с использованием аппаратно-программного комплекса NeuroDog. Комплекс предназначен для обучения пользователя навыкам релаксации путем визуализации его текущего уровня бодрствования на экране монитора; текущий уровень бодрствования пользователя оценивается путем измерения параметров электродермальной активности кожи с помощью специального датчика (браслета, перстня). Количество БОС-сеансов – 10. Продолжительность каждого сеанса 15–20 минут. По результатам БОС-тренинга испытуемых распределили на три группы [3] (первая – успешная (47 чел.); вторая – менее успешная (39 чел.); третья – неуспешная (20 чел.)). Оценку профессионально важных качеств испытуемых проводили с использованием УПДК-МК [3].

Для определения того, от совокупности каких психофизиологических и личностных показателей зависит выработка навыка релаксации у машинистов локомотивных бригад, была применена множественная линейная регрессия (пошаговая регрессия с включением). С ее помощью построили регрессионные модели, объясняющие зависимость показателей выработки навыка достижения релаксации от тех или иных психофизиологических либо личностных характеристик машинистов локомотивных бригад. Расчеты выполняли в электронном пакете Statistica 10.0.

Результаты исследований и их обсуждение

В качестве показателей выработки навыка достижения релаксации ввели понятия «сумма КГР_{ср}-60 за сеансы» и «сумма КГР-150 за сеансы». Это суммы временных интервалов физической составляющей кожно-гальванической реакции (электрической активности кожи), отображающие изменения центральной нервной системы на какой-то короткий ситуационный раздражитель. В [3] представлено описание вычислений данных показателей в результате обработки первичных эмпирических данных.

Таким образом, в качестве зависимых переменных в полученных регрессионных моделях выступили показатели «сумма КГР_{ср}-60 за сеансы» и «сумма КГР-150 за сеансы». В качестве независимых переменных (предикторов) в модели включали разнообразные психофизиологические и личностные показатели, измеренные у испытуемых с использованием УПДК-МК в ходе исследований. Построенные в результате регрессионного анализа модели оказались адекватными, т. е. имели удовлетворительное качество, что дает возможность на их основе судить о том, какие именно свойства и каким образом определяют изменения у машинистов локомотивных бригад экспериментальных показателей, характеризующих успешность выработки навыка достижения релаксации.

Множественный регрессионный анализ позволяет прогнозировать показатели, отображающие успешность выработки навыка релаксации в зависимости от выраженности психофизиологических и личностных характеристик машинистов локомотивных бригад.

Регрессионная модель зависимости «суммы КГР_{ср-60} за сеансы» от психофизиологических и личностных характеристик машинистов локомотивных бригад. Регрессионная модель имеет следующие показатели качества: коэффициент детерминации $R^2 = 0,75$ (при $F(49, 56) = 3,51$, $p = 0,0000043$), статистика Дарбина-Уотсона $d = 2,09$. Таким образом, качество данной модели оцениваем, как достаточное.

В качестве предикторов в регрессионной модели обнаружены: время выполнения задания на эмоциональную устойчивость ($\beta = -0,58$), недоверчивый тип внутриличностных отношений (октант 4) ($\beta = -0,55$), среднее время реакции на сигналы без предупреждения ($\beta = -0,54$), среднее время реакции на сигналы с предупреждением ($\beta = 0,53$), ММРІ 3 – эмоциональная лабильность ($\beta = -0,51$), психологическое утомление ($\beta = 0,50$), объем внимания (количество знаков) ($\beta = -0,38$), тремор (большое отверстие) ($\beta = -0,36$), концентрация (количество ошибок) ($\beta = 0,36$), зависимый тип внутриличностных отношений (октант 6) ($\beta = -0,35$), эмоциональная устойчивость ($\beta = 0,34$), ММРІ 0 – социальная интроверсия ($\beta = -0,34$), фактор G: низкая-высокая нормативность поведения ($\beta = -0,32$), количество ошибок (эмоциональная устойчивость) ($\beta = -0,31$), количество ошибок в сложной двигательной реакции ($\beta = -0,29$), теппинг-3 ($\beta = 0,28$), фактор N: прямолинейность-дипломатичность ($\beta = 0,28$), интернальность в области производственных ($\beta = 0,26$) и в области межличностных отношений ($\beta = -0,25$), фактор Q2: зависимость от группы – самостоятельность ($\beta = 0,21$), эмоциональный стресс ($\beta = -0,21$), вегетативный коэффициент ($\beta = 0,20$). Множественный коэффициент корреляции $R = 0,87$.

Выводы: «сумма КГР_{ср-60} за сеансы» эксперимента будет увеличиваться с накоплением психологического утомления, с ускорением темпа рук, с увеличением ошибок при оценке концентрации внимания, с увеличением среднего времени реакции на сигналы с предупреждением, а также с возрастанием вегетативного коэффициента, т. е. со смещением энергетического баланса в сторону энергозатрат. Увеличению «сумма КГР_{ср-60} за сеансы» способствуют такие личностные особенности, как самостоятельность, умение вести себя в обществе, дипломатичность, выраженная интернальность в области производственных отношений. Уменьшение «суммы КГР_{ср-60} за сеансы» может происходить под воздействием таких психофизиологических факторов, как усиление тремора правой руки в большом диаметре (как показатель нарастания психоэмоционального напряжения), увеличение количества ошибок в сложной двигательной реакции и среднего времени реакции на сигналы без предупреждения при оценке бдительности, усиление эмоционального стресса, увеличение времени выполнения задания и количества ошибок, допущенных при оценке эмоциональной устойчивости. К личностным характеристикам машинистов и помощников машинистов, которые указывают на то, что для данных испытуемых возможно уменьшение «суммы КГР_{ср-60} за сеансы», относятся интровертированность, эмоциональная лабильность, более высокая нормативность поведения, недоверчивость, зависимость, выраженная интернальность в области межличностных отношений.

Регрессионное уравнение для прогнозирования «суммы КГР_{ср-60} за сеансы» выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Сумма КГР}_{\text{ср-60}} \text{ за сеансы} = & 1886,721 - 6,557x_1 - 106,750x_2 - 4,616x_3 + 3,990x_4 - \\ & - 32,629x_5 + 108,580x_6 - 0,985x_7 - 76,597x_8 + 93,837x_9 - 78,773x_{10} + 7,037x_{11} - \\ & - 17,861x_{12} - 78,619x_{13} - 222,068x_{14} - 79,460x_{15} + 12,975x_{16} + 87,358x_{17} + \\ & + 87,671x_{18} - 82,041x_{19} + 61,381x_{20} - 43,555x_{21} + 419,348x_{22} - 13,818x_{23} + \\ & + 1,827x_{24} + 18,581x_{25} + 49,697x_{26} - 9,56x_{27} - 108,564x_{28} - 0,251x_{29} + 6,354x_{30} + \\ & + 13,148x_{31} + 1,934x_{32} + 47,69x_{33} - 24,604x_{34} + 6,941x_{35} + 55,371x_{36} - 5,2x_{37} + \\ & + 8,832x_{38} - 2,043x_{39} + 12,627x_{40} - 35,47x_{41} + 8,533x_{42} + 45,522x_{43} - 44,623x_{44} + \\ & + 49,073x_{45} + 43,084x_{46} - 47,637x_{47} + 8,025x_{48} + 0,31x_{49}, \end{aligned}$$

где x_1 – время выполнения задания на эмоциональную устойчивость; x_2 – недоверчивый тип внутриличностных отношений; x_3 – среднее время реакции на сигналы без предупреждения; x_4 – среднее время реакции на сигналы с предупреждением; x_5 – ММРІ 3; x_6 – психологическое утомление; x_7 – объем внимания; x_8 – тремор; x_9 – концентрация; x_{10} – зависимый тип

внутриличностных отношений; x_{11} – эмоциональная устойчивость; x_{12} – ММРІ 0; x_{13} – фактор G; x_{14} – количество ошибок (эмоциональная устойчивость); x_{15} – количество ошибок в сложной двигательной реакции; x_{16} – теппинг-3; x_{17} – фактор N; x_{18} – интернальность в области производственных отношений; x_{19} – интернальность в области межличностных отношений; x_{20} – фактор Q2; x_{21} – эмоциональный стресс; x_{22} – вегетативный коэффициент; x_{23} – внутриличностный октант 1 (Лири); x_{24} – среднеквадратическое отклонение времени сложной двигательной реакции; x_{25} – внутриличностный октант 8; x_{26} – фактор O; x_{27} – теппинг/1; x_{28} – число пропущенных сигналов без предупреждения (оценка бдительности); x_{29} – F3 (Кеттелла); x_{30} – ММРІ 4; x_{31} – личностная тревожность; x_{32} – межличностное дружелюбие; x_{33} – межличностный октант 3 (Лири); x_{34} – количество ошибок в простой двигательной реакции; x_{35} – межличностный октант 4 (Лири); x_{36} – внутриличностный октант 3 (Лири); x_{37} – ММРІ 6; x_{38} – ММРІ 7; x_{39} – среднее время простой двигательной реакции; x_{40} – ММРІ K; x_{41} – психологическое напряжение (Люшер); x_{42} – теппинг/6; x_{43} – межличностный октант 6 (Лири); x_{44} – фактор F; x_{45} – фактор H; x_{46} – внутриличностный октант 5 (Лири); x_{47} – фактор E; x_{48} – ситуативная тревожность; x_{49} – среднеквадратическое отклонение чувства времени.

Регрессионная модель зависимости «суммы КГР-150 за сеансы» от психофизиологических и личностных характеристик машинистов локомотивных бригад. Регрессионная модель характеризуется следующими показателями качества: коэффициент детерминации $R^2 = 0,71$ (при $F(40, 65) = 4,06$, $p = 0,00000027$), статистика Дарбина-Уотсона $d = 1,81$. Исходя из этого, делаем вывод о хорошем качестве модели.

Согласно полученной регрессионной модели, длительность «сумм КГР-150 за сеансы», зафиксированных на протяжении всех сеансов, зависит от следующих переменных: ММРІ 3 – эмоциональная лабильность ($\beta = -0,66$); время выполнения задания на эмоциональную устойчивость ($\beta = -0,52$), независимый тип межличностных отношений (октант 2) ($\beta = -0,44$); фактор M: практичность-мечтательность ($\beta = 0,38$), ММРІ 1 – невротический сверхконтроль ($\beta = 0,36$), ММРІ 4 – импульсивность ($\beta = 0,30$), межличностное доминирование ($\beta = 0,29$), суммарное отклонение от аутогенной нормы ($\beta = 0,28$), агрессивный тип внутриличностных отношений (октант 3) ($\beta = 0,27$); фактор O: спокойная самоуверенность – склонность к чувству вины ($\beta = 0,27$), ММРІ 9 – оптимистичность ($\beta = -0,26$), тремор (большое отверстие) ($\beta = -0,26$); фактор G: низкая-высокая нормативность поведения ($\beta = -0,25$); фактор A: замкнутость – общительность ($\beta = 0,25$), эмоциональная устойчивость ($\beta = 0,23$), ММРІ 0 – социальная интроверсия ($\beta = -0,23$), теппинг-3 ($\beta = 0,23$), психологическое напряжение ($\beta = -0,22$); фактор H: робость-смелость ($\beta = 0,21$), среднеквадратическое отклонение времени простой двигательной реакции ($\beta = 0,20$), объем внимания (количество знаков) ($\beta = -0,19$), интернальность в области производственных отношений ($\beta = 0,16$). Множественный коэффициент корреляции R между зависимой и независимыми переменными составил 0,85.

Выводы: «сумма КГР-150 за сеансы» увеличивается при большем среднеквадратическом отклонении времени простой двигательной реакции и большем суммарном отклонении от аутогенной нормы (т. е. при более неблагоприятном эмоциональном фоне). К личностным характеристикам машинистов, определяющим увеличение «суммы КГР-150 за сеансы», относятся показатели: мечтательность, стремление целенаправленно и упорно преодолевать трудности; высокая активность в социальных контактах, социальная смелость; склонность к избыточному контролю над поведением и высказываниями; неуверенность, нерешительность, повышенное чувство вины; интернальность в области производственных отношений. Уменьшение «суммы КГР-150 за сеансы» может наблюдаться в том случае, если у испытуемых устанавливаются увеличение времени выполнения задания на эмоциональную устойчивость и усиление тремора правой руки в большом диаметре. Большая «сумма КГР-150 за сеансы», высоковероятно, будет отмечаться у машинистов, которые отличаются большей интровертированностью, эмоциональной лабильностью, более высокой нормативностью поведения, самодовольством, оптимистичностью и сопряженными с нею хорошим жизненным тонусом и энергичностью и находятся в достаточно сильном психологическом напряжении.

Регрессионное уравнение для прогнозирования «суммы КГР-150 за сеансы» выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned} \text{Сумма КГР-150 за сеансы} = & 1737,575 - 39,168x_1 - 5,426x_2 - 95,465x_3 + 94,598x_4 + 22,418x_5 + \\ & + 18,672x_6 + 21,776x_7 + 23,209x_8 + 73,422x_9 + 59,060x_{10} - 15,012x_{11} - 50,080x_{12} - 56,236x_{13} + \\ & + 66,941x_{14} + 4,385x_{15} - 11,143x_{16} + 9,635x_{17} - 50,905x_{18} + 58,701x_{19} + 4,320x_{20} - 0,439x_{21} + \\ & + 51,801x_{22} - 22,413x_{23} + 11,358x_{24} + 26,929x_{25} + 1,494x_{26} - 0,942x_{27} - 33,805x_{28} - 65,138x_{29} - \\ & - 41,964x_{30} + 17,974x_{31} + 45,930x_{32} + 8,120x_{33} + 52,884x_{34} - 41,838x_{35} - 2,335x_{36} + 54,891x_{37} - \\ & - 6,529x_{38} - 1,328x_{39} + 96x_{40}, \end{aligned}$$

где x_1 – ММРІ 3; x_2 – время выполнения задания на эмоциональную устойчивость; x_3 – независимый тип межличностных отношений (октант 2); x_4 – фактор М; x_5 – ММРІ 1; x_6 – ММРІ 4; x_7 – межличностное доминирование; x_8 – суммарное отклонение от аутогенной нормы; x_9 – агрессивный тип внутриличностных отношений (октант 3); x_{10} – фактор О; x_{11} – ММРІ 9; x_{12} – тремор (большое отверстие); x_{13} – фактор G; x_{14} – фактор А; x_{15} – эмоциональная устойчивость; x_{16} – ММРІ 0; x_{17} – теппинг-3; x_{18} – психологическое напряжение; x_{19} – фактор Н; x_{20} – среднее квадратическое отклонение времени простой двигательной реакции; x_{21} – объем внимания (количество знаков); x_{22} – интернальность в области производственных отношений; x_{23} – внутриличностный октант 1 (Лири); x_{24} – внутриличностный октант 8 (Лири); x_{25} – психологическое утомление (Люшер); x_{26} – среднее квадратическое отклонение времени сложной двигательной реакции; x_{27} – среднее время сложной двигательной реакции; x_{28} – F3 (Кеттелла); x_{29} – количество ошибок (оценка эмоциональной устойчивости); x_{30} – внутриличностный октант 6 (Лири); x_{31} – фактор Q1; x_{32} – межличностный октант 7; x_{33} – ММРІ F; x_{34} – F1; x_{35} – объем внимания (количество символов); x_{36} – бдительность; x_{37} – число пропущенных сигналов с предупреждением (оценка бдительности); x_{38} – ситуативная тревожность; x_{39} – среднее время простой двигательной реакции; x_{40} – тремор (среднее отверстие).

Заключение

1. В качестве показателей выработки навыка достижения релаксации ввели понятия «сумма КГР_{ср}-60 за сеансы» и «сумма КГР-150 за сеансы».

2. Построены регрессионные модели, объясняющие зависимость показателей выработки навыка достижения релаксации от психофизиологических и личностных характеристик машинистов локомотивных бригад.

3. Полученные регрессионные модели зависимости «суммы КГР_{ср}-60 за сеансы» и «суммы КГР-150 за сеансы» от психофизиологических и личностных характеристик машинистов локомотивных бригад характеризуются достаточным и хорошим качеством соответственно. Модели имеют следующие показатели качества: «сумма КГР_{ср}-60 за сеансы» – коэффициент детерминации $R^2 = 0,75$ (при $F(49, 56) = 3,51$, $p = 0,0000043$), статистика Дарбина-Уотсона $d = 2,09$; «сумма КГР-150 за сеансы» – $R^2 = 0,71$ (при $F(40, 65) = 4,06$, $p = 0,00000027$), $d = 1,81$.

4. Выведены регрессионные уравнения для прогнозирования показателей выработки навыка достижения релаксации «сумма КГР_{ср}-60 за сеансы» и «сумма КГР-150 за сеансы».

Список литературы

1. Обзор и сравнительный анализ методов и систем для развития навыков релаксации / Ю. А. Гедранович [и др.] // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. 2016. № 1. С. 62–69.
2. Обзор и сравнительный анализ методов и систем для развития навыков релаксации / Ю. А. Гедранович [и др.] // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. 2016. № 2. С. 44–50.
3. Щербина, Н. В. Исследование метода выработки навыка на релаксацию с биологической обратной связью по параметрам электродермальной активности / Н. В. Щербина, В. В. Савченко, К. Д. Яшин // Новости медико-биологических наук. 2019. № 1. С. 65–73.

4. Щербина, Н. В. Регуляция функционального состояния машинистов локомотивных бригад с применением БОС-тренинга: факторный анализ экспериментальных данных / Н. В. Щербина // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 4. С. 28–36. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-28-36.
5. Щербина, Н. В. Анализ различий между группами машинистов локомотивных бригад с разной степенью способности к произвольной регуляции их функционального состояния / Н. В. Щербина // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 2. С. 21–29. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-21-29.
6. Щербина, Н. В. Дифференциальная диагностика способности к выработке навыка релаксации у машинистов локомотивных бригад / Н. В. Щербина // Доклады БГУИР. 2022. Т. 20, № 4. С. 96–103.

References

1. Gedranovich Yu. A., Savchenko V. V., Yashin K. D., Shcherbina N. V. (2016) Review and Comparative Analysis of Methods and Systems for the Development of Relaxation Skills. *Chelovecheskiy Faktor: Problemy Psikhologii i Ergonomiki = Human Factor: Problems of Psychology and Ergonomics*. (1), 62–69 (in Russian).
2. Gedranovich Yu. A., Savchenko V. V., Yashin K. D., Shcherbina N. V. (2016) Review and Comparative Analysis of Methods and Systems for the Development of Relaxation Skills. *Chelovecheskiy Faktor: Problemy Psikhologii i Ergonomiki = Human Factor: Problems of Psychology and Ergonomics*. (2), 44–50 (in Russian).
3. Shcherbina N. V., Savchenko V. V., Yashin K. D. (2019) Research of the Method of Developing a Skill for Relaxation with Biological Feedback on the Parameters of Electrodermal Activity. *Novosti Mediko-Biologicheskikh Nauk = News of Medical and Biological Sciences*. (1), 65–73 (in Russian).
4. Shcherbina N. V. (2021) Regulation of the Functional State of Locomotive Crew Drivers Using Biofeedback Training: Factor Analysis of Experimental Data. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 19 (4), 28–36. DOI: 10.35596/1729-7648-2021-19-4-28-36 (in Russian).
5. Shcherbina N. V. (2022) Analysis of Differences between Groups of Locomotive Crew Drivers with Different Degrees of Ability to Arbitrarily Regulate their Functional State. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 20 (2), 21–29. DOI: 10.35596/1729-7648-2022-20-2-21-29 (in Russian).
6. Shcherbina N. V. (2022) Differential Diagnosis of the Ability to Develop the Skill of Relaxation in the Drivers of Locomotive Crews. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 20 (4), 96–103 (in Russian).

Сведения об авторе

Щербина Н. В., старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Shcherbina N. V., Senior Lecturer of Engineering Psychology and Ergonomics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 755-92-70
E-mail: shcherbina@bsuir.by
Щербина Наталья Витальевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 755-92-70
E-mail: shcherbina@bsuir.by
Shcherbina Natalia Vitalievna

ПРИМЕРЫ ОФОРМЛЕНИЯ РАЗДЕЛА «СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ»

В помощь авторам при формировании литературных источников в разделе «Список литературы» предлагаем несколько примеров их оформления согласно Приложению 2 к Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертации (ВАК) (тире, указанные в таблице Приложения 2 для оформления источников, не ставим).

1. Обзор и сравнительный анализ методов и систем для развития навыков релаксации / Ю. А. Гедранович [и др.] // Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики. 2016. № 1. С. 62–69.
2. Щербина, Н. В. Исследование метода выработки навыка на релаксацию с биологической обратной связью по параметрам электродермальной активности / Н. В. Щербина, В. В. Савченко, К. Д. Яшин // Новости медико-биологических наук. 2019. № 1. С. 65–73.
3. Щербина, Н. В. Регуляция функционального состояния машинистов локомотивных бригад с применением БОС-тренинга: факторный анализ экспериментальных данных / Н. В. Щербина // Доклады БГУИР. 2021. Т. 19, № 4. С. 28–36. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-28-36>.
4. Теория кодирования / Т. Касами [и др.], пер. с япон. А. В. Кузнецова. М.: Мир, 2006. 571 с.
5. Лосев, В. В. Поиск и декодирование сложных дискретных сигналов / В. В. Лосев, Е. Б. Бродская, В. И. Коржик. М.: Радио и связь, 1988.
6. Скойбеда, А. Т. Ременные передачи / А. Т. Скойбеда, А. Н. Никончук. Минск: Навука і тэхніка, 1995.
7. Sze, S. M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S. M. Sze, Lee M. K. New York: John Wiley & Sons Singapore Pte. Limited, 2012.
8. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А. П. Достанко [и др.], под ред. А. П. Достанко. Минск: Беларус. навука, 2020. 260 с.
9. Electromagnetic Radiation Shielding Composite Coatings Based on Powdered Alumina and Iron Oxides / D. I. Penialosa Ovalies [et al.] // Doklady BGUIR. 2021. Vol. 19, No 3. P. 104–109. <http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-3-104-109>.
10. Blackman, S. Design and Analysis of Modern Tracking Systems / S. Blackman, R. Popoli // Artech House. Boston – London, 1999.
11. Аповорич, В. А. Характеристики алгоритмов оптимизации, используемых при решении задачи отождествления траекторий и отметок / В. А. Аповорич, В. С. Дудко, А. И. Минов // Milex.Innovations-2019: 8-я Междунар. научная конф. по военно-техн. вопр., проблемам обороны и безопасности, использ. технологий двойного примен., 16–17 мая 2019 г., г. Минск. Минск, 2019. Ч. 5. Лаборатория интеллекта. 8 с.
12. Software Reliability, Measurement, and Testing Guidebook for Software Reliability Measurement and Testing [Electronic Resource] / J. A. McCall [et al.]. 1992. Mode of access: <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a256164.pdf>. Date of access: 20.04.2020.
13. Shaila, D. Apte, Digital Signal Processing / D. Shaila, 2nd ed. Wiley India, 2009.
14. Водозаборная скважина: пат. Респ. Беларусь 23608 / В. В. Ивашечкин, Ю. А. Медведева. Оубл. 30.12.2021.
15. Энергетическая эффективность. Оценка энергоэффективности насосных систем: ГОСТ 33969–2016. Введ. 01.03.2019. М.: Стандартинформ, 2017. 45 с.

Оформление не попавших в перечисленные выше примеры литературных источников смотрите в таблице Приложения 2 указанной инструкции.

При оформлении раздела REFERENCES следует указывать ВСЕХ авторов в цитируемой публикации:

1. Cunningham R. D., Brander R. W., Knee N. D., Wickenden D. K. (1972) Variation of Photoluminescence with Carrier Concentration in GaN. *Journal of Luminescence*. 5 (1), 21–31. DOI:10.1016/0022-2313(72)90032-4.
2. Gulpa D. Y., Kuzmar I. I., Kushner L. K., Dezhkunov N. V., Khmyl A. A. (2021) Electrochemical Deposition of Tin-Copper Alloy Coatings. *Doklady BGUIR*. 19 (27), 49–57 (in Russian).
3. Chong Gu, Yongho Jeon, Yi Lin (2013) Nonparametric Density Estimation in High-Dimensions. *Statistica Sinica*, 23, 1131–1153.
4. Devroye L., Györfi L. (1985) *Nonparametric Density Estimation: the L1 View*. New York, John Wiley Sons Publ.
5. Solomon C. J., Breckon T. P. (2010) *Fundamentals of Digital Image Processing: a Practical Approach with Examples in Matlab*. USA, Wiley-Blackwell Publ. DOI: 10.1002/9780470689776.
6. Novitskiy P. V., Zograf I. A. (1991) *Evaluation of Errors of Measurement Results, 2-e izd. pererab. i dop.* Leningrad, Energoatomizdat Publ., Leningrad. Otdelenie. 304 (in Russian).